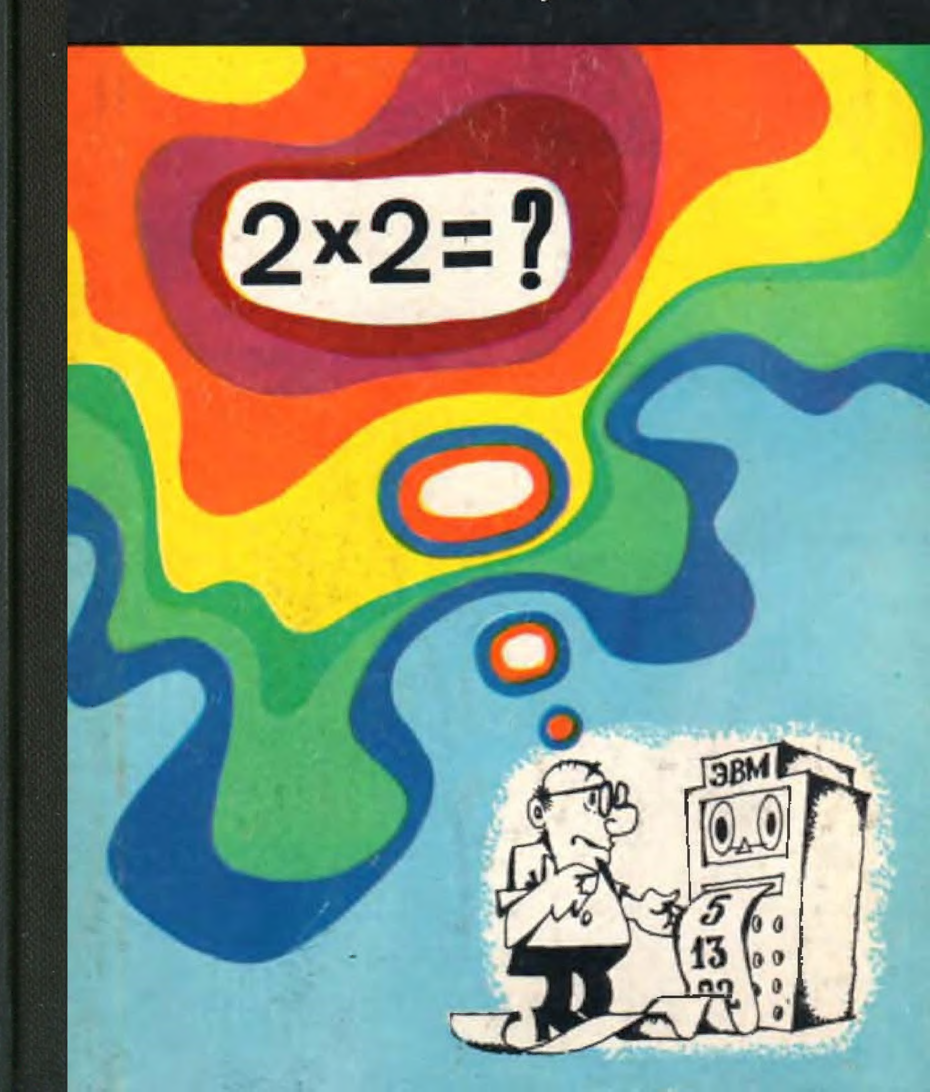
Эврика

Л. Растригин

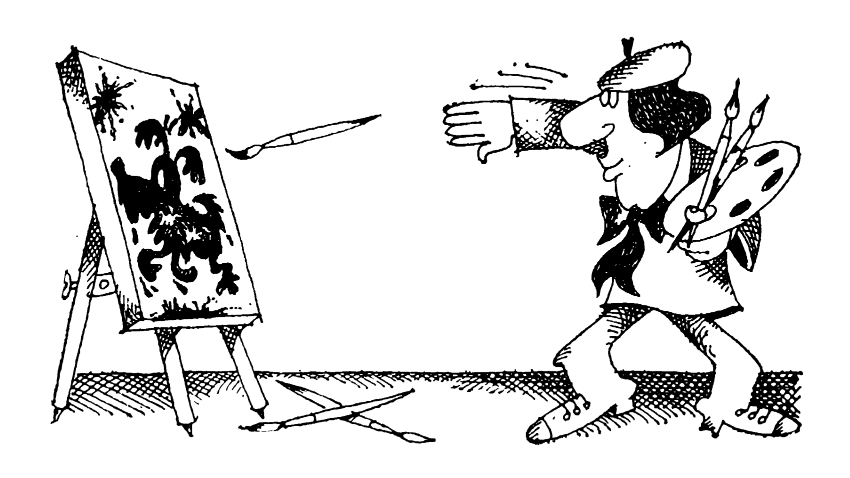
По воле случая



Л. Растригин По воле случая

Л. Растригин

По воле случая





Москва
«Молодая гвардия»
1986

ББК 22.171
Р 24

Растригин Л. А.

Р 24 По воле случая. — М. : Мол. гвардия, 1986. — 208 с., ил. — (Эврика).

В пер.: 55 к. 100 000 экз.

Случайности подстерегают нас на каждом шагу. Как подчинить их себе? Как может использовать их при решении научных проблем и технических задач ученый, инженер, конструктор, рабочий? Об этом рассказывается в книге доктора наук Л. Растригина.

Р $\frac{1702060000-164}{078(02)-86}$ 284—86 **ББК 22.171 + 32.811**



Введение

Ты должен сделать добро из зла, потому что его больше не из чего сделать.

Р. П. Уоррен

Эта книга о доброй случайности. Случай поворачивался к человеку (и человечеству) своими разными сторонами. Но чаще всего это была неприятная сторона. Действительно, большинство своих бед каждый из нас склонен считать случайными. И на это у нас находится достаточно убедительных доводов.

Дело в том, что всякую свою неудачу и неприятность человек может относить за счет двух факторов: «зловредности» среды, его окружающей, и собственной оплошности. В первом слу́чае он, естественно, «обвиняет» среду, а во втором чаще всего... тоже среду, так как именно среда создала те обстоятельства, при которых была совершена оплошность, и именно этим она «виновата». Итак, все неприятности от среды!

А что же именно в среде является источником этих неприятностей? Поначалу таким источником были бог и дьявол — активные генераторы неприятностей, порожденные религиозным сознанием. (Бог посылал неприятности за какие-то грехи — свои и чужие, а дьявол гадил человечеству просто так — из любви к искусству делать неприятности.) Остатки такого мистического склада мышления остались и в наших просвещенных головах. Действительно, очень часто мы свои неприятности (и в быту и по службе) склонны объяснять кознями каких-то злых сил — наших недругов и «доброжелателей». (В патологии это свойство приводит к мании преследования.)

Такое объяснение было достаточным для большинства. Оно успокаивало, так как давало «ясное» объяснение,

что-де все происходит по божьей (или дьявольской, там где бог не усмотрел) воле.

Но вот сравнительно недавно (по меркам истории человечества, разумеется) этот взгляд начал давать трещину, которая все ширилась и ширилась, пока не разрушила храм мистического мышления.

А началось все с того, что стали выявляться закономерности, которые действовали не в согласии с чьей-то волей, а сами по себе. Так, например, камень падал на землю не по божьей воле, а по закону всемирного тяготения, война проигрывалась не в результате дьявольских козней, а из-за плохого вооружения солдат или бездарного полководца. Все происходящее вокруг человека, да и в нем самом начинало получать объяснение и не нуждалось в привлечении дополнительной гипотезы о суще-



ствования бога (и дьявола). Девиз «бога нет!» становился все более популярным.

Но наука, которая занималась изгнанием бога, естественно, не могла и никогда не сможет объяснить абсолютно все явления в нашем мире — всегда останется что-то непознанное, так как мир неисчерпаем. Как же относиться к этому самому, еще не объясненному наукой? При наличии идеи бога все это удобно списывать на него, чем широко пользуются церковники (например, при «объяснении» некоторых психологических явлений, еще плохо изученных современной наукой). Ну а если бога нет? Как же классифицировать явления, не поддающиеся объяснению?

Их и назвали *случайными*! (О том, что такое случайность, мы поговорим в первой главе.) Человек в своей жизни сталкивается с ситуациями двоякого рода. К первому относятся «хорошие» ситуации, относительно которых ему все понятно и, следовательно, ясно, как действовать, чтобы добиться своих целей. Второй тип ситуаций уж никак нельзя считать «хорошим», так как это случайные ситуации, в которых пока неизвестно, как действовать. Назвать их все «плохими» нельзя: среди них редко, но попадаются хорошие и даже очень (все мы знаем о счастливых случайностях вроде выигрыша в лотерее). Но часто, и значительно чаще, чем этого хотелось бы, случайные ситуации приносят неприятности хотя бы тем, что заставляют нас исхитряться и придумывать новые способы достижения целей, а не пользоваться уже известными и проверенными на «хороших» ситуациях.

Именно поэтому со случайностью у человека всегда связан неприятный эмоциональный оттенок: случайно — это почти всегда плохо. Если, например, вам скажут, что за этой дверью вас встретит неожиданность, наверняка вы с опаской будете открывать эту дверь, а то и просто откажетесь идти туда.

Случайности буквально осаждают нас со всех сторон и имеют самый различный облик. Так, случайные помехи препятствуют дальней связи, случайные ошибки измерения не дают возможность эффективно управлять производственными процессами, случайность в поведении атмосферы не позволяет делать точные прогнозы погоды, отсутствие необходимой информации приводит к случайным представлениям о поведении интересующих нас объектов (механизмов, схем, животных, людей и т. д.) и не позволяет предвидеть их поведение и т. д. и т. п. Без преуве-

личения можно сказать, что наш мир — это случайный мир, очень случайный мир, пожалуй, самый случайный мир...

Случайность достаточно много напортила человеку и человечеству и продолжает портить его жизнь. Именно поэтому, живя в случайном мире, людям волей-неволей пришлось научиться бороться со случайностью («плохой», разумеется).

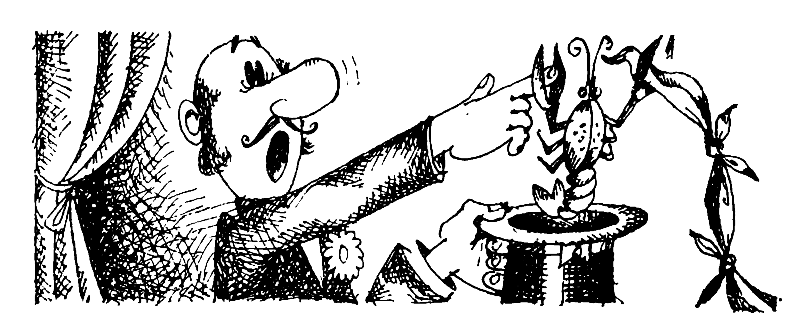
За многострадальную историю общения со случаем человечеством выработаны эффективные методы борьбы со случайностью. Одним из таких приемов является, например, осреднение. Если, измеряя что-то, вы получаете различные результаты, так как действует случайная помеха в виде ошибок измерения, то влияние этой случайности на результат можно снизить, если осреднить результаты отдельных измерений, то есть сложить их и разделить полученную сумму на число измерений. Таких приемов придумано много. Возникли целые науки о том, как же эффективно действовать в нашем трижды случайном мире. Их задачей является уменьшение неприятностей от случайности. Именно такие рекомендации дают математическая статистика, теория статистических решений и т. д. Это оборона, которую держит человечество против случайности нашего мира. И оборона неплохая.

Но одной обороной битвы не выиграешь. Кроме щита, здесь нужен меч! И таким мечом в борьбе человечества с суровой природой является... случайность. Да-да, именно та случайность, которая так много доставляет неприятностей, может быть эффективным средством борьбы с трудностями, которые преодолевает человечество по пути прогресса (по принципу «клин клином вышибают»).

Пока фронт использования случайности невелик, но он быстро расширяется. Трудности здесь прежде всего психологического характера — уж слишком хорошо «знают» люди, что случайность — это плохо, и поэтому стараются избегать ее.

Но успехи использования случайности для решения конкретных задач слишком велики, чтобы их не замечать. И постепенно, преодолевая свою законную неприязнь к случайности, человечество начинает все более и более обращать свой взгляд на нее как на источник огромных возможностей.

Именно такая роль случая описана в этой книге. Случаю-другу, случаю-помощнику, случаю-защитнику, случаю-творцу и изобретателю посвящена эта книга.



глава первая

ЧТО ЖЕ ТАКОЕ СЛУЧАЙНОСТЬ?

Случай играет в мире столь большую роль, что обыкновенно я стараюсь отвести ему как можно меньше места, в уверенности, что и без моей помощи он позаботится о себе.

А. Дюма

Прежде чем говорить о том, как можно использовать случай, попробуем ответить на вопрос, вынесенный в название главы. Здесь осторожное «попробуем» автор использовал вовсе не из-за ложной скромности. Дело в том, что относительно того, что называть случайностью, ни в науке, ни в искусстве, ни в обыденной жизни — нигде нет однозначных представлений. Если читатель возьмет философский словарь, то он сможет прочесть: «Случайность — см. необходимость». И это не забавный курьез, а свидетельство негативной позиции авторов иных словарей. Им ничего не оставалось, как определить случайность через отсутствие детерминизма. Такие негативные определения, по сути, ничего не определяют. Так, например, из утверждения, что *«Б.* не дурак» совсем не следует, что он умный. Аналогично случайность не есть отсутствие необходимости, тем более что есть совершенно необходимые случайности — мы их рассмотрим ниже.

Случай как незнание (Модель № 1)

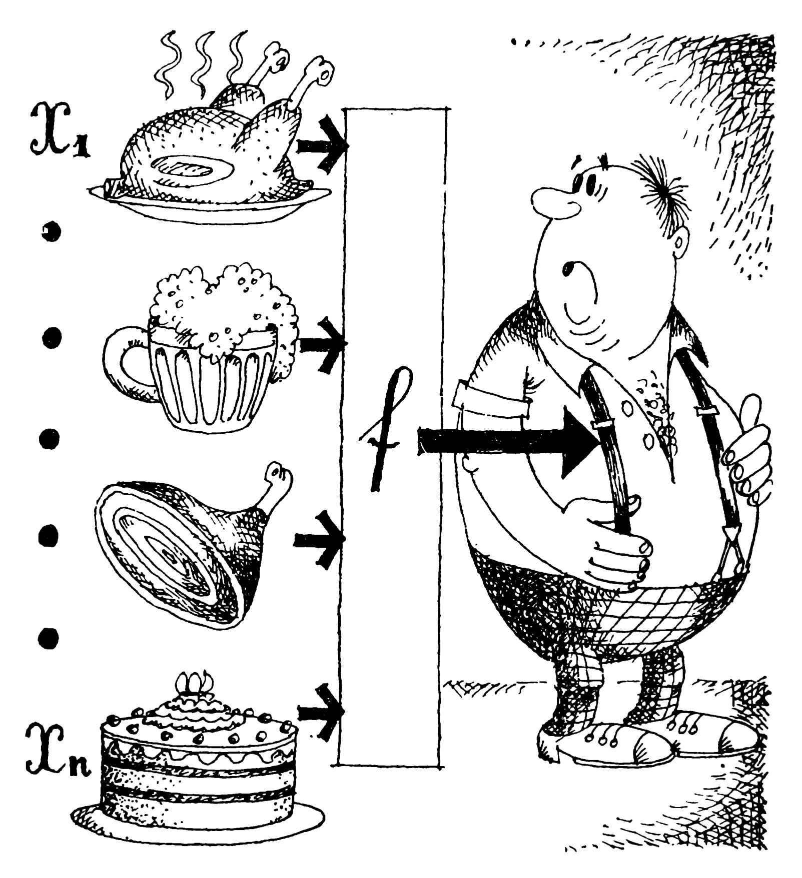
Одним из мощнейших источников случайности является незнание, то есть отсутствие необходимой информации. Посмотрите, например, на человека, приближающегося к перекрестку! Куда он пойдет? Прямо? Направо?

Или налево? Его поведение для нас наверняка будет непредсказуемым, случайным.

А является ли оно таковым в действительности? Не обязательно! Скорее всего человек шел по своим делам и заранее знал, куда повернет на этом перекрестке. Никакой случайности в его поведении не было и в помине.

На первый взгляд здесь явное противоречие. Один и

Вот таким образом удобно представлять причинно-следственные связи любых явлений. Явление f заключается в том, что связывает причины x_1, x_2, x_3, ... x_n со следствием y. Зная это явление и все причины, его порождающие, легко определить следствие y. Так, например, отец x_1 и мать x_2 являются причинами появления ребенка y, причем f здесь является механизмом зарождения и развития нового существа.



тот же поступок — поведение прохожего на перекрестке — является и случайным и неслучайным! В чем здесь дело?

Ключом к разгадке является информация или, точнее, ее отсутствие у вас при предсказании поведения пешехода. Именно незнание целей пешехода делает его поступки случайными для наблюдателя. Так незнание порождает случайность.

Легко построить модель случайности такого рода. Эта модель опирается на понятие причинно-следственной связи. Ее смысл очень прост: между причиной и ее следствием всякого явления всегда существует «железная» связь: причина порождает следствие. Например, дребезжание электрического звонка (это следствие y) мы услышим только при выполнении двух условий: при наличии напряжения в электрической сети (это причина x_1) и при нажатии кнопки у входной двери (это причина x_2). Очевидно, что при неопределенном состоянии одной из этих двух причин также будет неопределенным и следствие.

На рисунке схематически показано явление f в виде преобразователя n причин x_1, x_2, ...x_n в следствие y. Зная явление f и состояние всех его причин, мы вполне определенно знаем следствие y. И никакой случайности здесь нет.

Но... (вот здесь и появляется случайность) если какие-то из причин x_1, x_2, ...x нам неизвестны, то относительно следствия y мы твердо и определенно говорить не можем. Оно становится случайным для нас.

Так незнание трансформируется в случайность. И единственный способ избавиться от такой случайности — это получить необходимую информацию о состоянии всех причин.

Очевидно, что со временем информации становится все больше и больше. Значит ли это, что меньше становится случайности?

И да и нет! Да — потому, что наука выявляет новые причинно-следственные связи явлений, то есть, строя их модели, делает эти явления предсказуемыми, не случайными. Так, например, развитие метеорологии делает все более точными прогнозы погоды. А пол ребенка теперь можно определить на первых неделях беременности. Раньше и то и другое считалось совершенно случайным.

Но наука обладает одним досадным свойством, которое очень точно подметил Б. Шоу: она не решает ни одного вопроса, не поставив десятка новых. Но каждая

новая проблема в науке — это источник новой случайности, так как всякая проблема сводится к синтезу модели, а отсутствие модели порождает непредсказуемость и случайность. Фактически она постулирует то, что источником случайности является наше невежество (в широком смысле, разумеется). Чем более мы невежественны в каком-либо явлении, тем более случайно для нас его проявление. И только познание этого явления, синтез его модели срывают с него покров (точнее, рубище) случайности.

Эта обидная ипостась случайности (быть мерой невежества), к сожалению, является наиболее распространенной, но далеко не единственной.

Случай как неумение (Модель № 2)

Пусть мы преодолели наше незнание и осведомлены о всех причинах x_1, x_2, $...x_n$ интересующего нас явления. Значит ли это, что мы полностью справились со случайностью и можем точно предвидеть следствие y этих причин?

Увы! Далеко не всегда. Все зависит от того, как и чем измеряются причины x_1, x_2, $...x_n$. Ведь каждое измерение заключается в отнесении к измеряемому фактору (расстоянию, температуре и т. д.) определенного числа, которое показывает, сколько раз единица измерения (метр, секунда, градус и т. д.) укладывается на измеряемой величине (будем рассматривать лишь метрические шкалы, привычные нам).

Очевидно, что точность всякого измерения зависит от измерительного прибора. И она всегда конечна! Это означает, что, измеряя, мы всегда совершаем некоторую ошибку. Именно этим объясняется то, что следствие y определяется также с ошибкой, то есть неточность измерения причин неизбежно приводит к неточности определения следствий, к случайности. Поэтому естественно желание повысить точность измерения. А возможно ли это?

Конечно! Для того чтобы тем же прибором измерять точнее, нужно дополнительное время, и тем больше его приходится затрачивать, чем точнее мы хотим измерять. Делается это так. Надо осреднять результаты измерения, то есть многократно измерить и вычислить среднее, которое и является результатом. Чем больше число измерений, тем ближе результат их осреднения к точному зна-

чению измеряемой величины. Но ошибка при этом всегда остается. Она обратно пропорциональна числу измерений. И лишь при очень большом числе измерений, стремящемся к бесконечности, есть надежда, что измерение будет достаточно точным.

Таким образом, за повышение точности для преодоления случайности всегда надо платить дополнительными измерениями, а следовательно, временем. А если этого времени нет, как, например, при оперативном управлении, когда каждая минута дорога?

Тогда приходится мириться с приближенными измерениями и, значит, с появляющейся при этом случайностью и... ошибками при управлении.

Следовательно, вторая модель появления случайности связана с нашим неумением точно измерять причины.

Говоря проще, если уметь измерять точно все причины и если уметь вычислять их последствия, то можно как угодно точно предвидеть будущее (и, кстати, выявлять прошлое). Так считал Лаплас, полагая, что мир детерминирован и что его можно постичь до конца, имея мощный ум.

В этом утверждении все «если» являются слишком сильными предположениями. Ни одно из них в реальной жизни никогда, даже в далеком будущем, не осуществится. И препятствием этому является закон всеобщей связи и обусловленности явлений в природе, который не позволяет выявить все причины (их число бесконечно), и закон неизбежности ошибок при любых реальных измерениях.

Получается, что лапласовский «ум» ничем не отличается от самого настоящего бога — вездесущего и всеведающего, а лапласовский мир не более чем фильм, записанный на бесконечной ленте, развертывающийся перед нами. Мы являемся и зрителями и участниками этого фильма, причем действуем строго в соответствии со сценарием, написанным его создателем. Этот мир предопределен, фаталистичен. Будет только так, как записано в сценарии, — ничего иного не добьешься. А то, что ты бьешься, — это тоже записано в том же сценарии или «всеобъемлющем» уравнении.

Но это — фантазия! В действительности такого уравнения нельзя написать в принципе, и повинна в этом прежде всего...

Квантовомеханическая случайность (Модель № 3)

Рассмотрим простейшую задачу определения будущего положения частицы в вакууме. Очевидно, чтобы это сделать для любого момента, достаточно знать ее координаты и скорость в начальный момент.

Если знать!

А можно ли знать точно и координату и скорость частицы? Довольно простые рассуждения показывают, что сомнения здесь не излишни. Действительно, при определении координаты элементарной частицы (скажем, бета-частицы) мы воздействуем на нее измерительным прибором (например, освещая ее). А поскольку частица мала, то такого рода воздействие не может не изменить ее скорости. Вот и получается, что, измеряя местоположение, мы вносим погрешность в измерение скорости.

В феврале 1927 года молодой физик В. Гейзенберг в Копенгагене вывел очень простую формулу, из-за которой он стал бессмертным. Его тогда волновала проблема трудности одновременного измерения положения и скорости микрочастицы. Что это? Временная трудность, связанная с ограниченными возможностями измерительной техники, или что-то похуже?

Пусть Δx — неопределенность, ошибка определения положения микрочастицы, а Δv — неопределенность определения ее скорости. Могут ли эти величины быть сколь угодно малы в одном эксперименте? Именно так поставил задачу В. Гейзенберг.

Выведенная им теоретически формула выглядела достаточно пессимистично:

$$\Delta x \cdot \Delta v \geqslant h,$$

то есть произведение неопределенностей координаты и скорости частицы не может быть меньше кванта действия h. Величина этого кванта h очень мала, но конечна. Именно поэтому нельзя одновременно точно измерять положение и скорость микрочастицы. Это утверждение получило название принципа неопределенности Гейзенберга, а его квантовомеханический характер связан с тем, что оно рассматривает механические свойства частицы (ее координату и скорость), имеющей размеры порядка атомных.

Доказывает справедливость принципа неопределенности очень простой и чрезвычайно изящный эксперимент. Перед источником электронов — обычной раскаленной

спиралью — ставят два экрана. В первом, ближайшем к источнику, делается маленькое отверстие, а второй покрывается фосфоресцирующим слоем, который дает световую вспышку при попадании в него электрона. (На этом эффекте построена обычная телевизионная трубка, где еще добавлена система управления электронным пучком с помощью электрического поля, чем и достигается развертка изображения.)

Очевидно, что в эксперименте на втором экране будет светиться яркая точка — это конец пучка электронов, прошедших через отверстие в первом экране. Скорость этих электронов направлена от источника к отверстию, а их положение определяется отверстием — только через него электроны могут попасть на фосфоресцирующий экран.

Так будет, когда отверстие не слишком мало, то есть неопределенность $\triangle x$ — велика. Если же уменьшать отверстие, то сначала светящаяся точка на втором экране станет уменьшаться, а потом, начиная с определенной величины отверстия, вокруг нее образуются кольца, которые при дальнейшем уменьшении отверстия расползутся по всему экрану. И при диаметре отверстия, равном размеру электрона, вспышки будут наблюдаться равномерно-случайно по всему экрану.

На первый взгляд это противоречит здравому смыслу. Мы, желая сузить пучок электронов, уменьшаем отверстие, а проходящий через него пучок расширяется!

Соотношение неопределенностей Гейзенберга хорошо объясняет этот экспериментальный результат, повторенный неоднократно во многих лабораториях мира.

Действительно, сужая отверстие, мы уменьшаем неопределенность положения электрона Δx, проходящего через это отверстие. При этом неизбежно воздействуем на его скорость, так как электрон начинает взаимодействовать с краями отверстия. Но скорость — это же вектор, то есть не только величина, но и направление. Изменение направления движения электронов и фиксируется случайным разбросом вспышек на экране.

Соотношение неопределенностей фактически постулирует невозможность точных измерений в микромире. А отсутствие точности и есть источник случайности. И никакое совершенствование измерительной техники не поможет нам повысить точность и преодолеть эту случайность.

Таково свойство нашего случайного мира, отмеченное

В. Гейзенбергом. А отсюда следует очень важный вывод: все процессы в микромире случайны. Поэтому случайны и те макропроцессы, чье течение определяется на микроуровне.

Теплозые шумы (Модель № 4)

Когда голландец Антони ван Левенгук, торговец по профессии, шлифовщик оптических стекол по хобби и признанный основоположник научной микроскопии, впервые посмотрел на каплю воды через свой микроскоп, то был потрясен. Его потрясение разделило и Лондонское королевское общество, куда он отослал свой отчет в виде письма — так раньше совершались научные публикации.

В капле воды шевелились невиданные «зверюшки» —



именно так назвал А. Левенгук увиденные им микроорганизмы. Проходили десятилетия, совершенствовалась конструкция микроскопа (кстати, микроскоп А. Левенгука был совсем не похож на современный, он представлял собой линзу, которую нужно было поднести к самому глазу), тысячи исследователей изучали мир, открытый А. Левенгуком, и все видели, как двигались живые существа. Их движение и было первым и главным признаком их жизни.

Но вот через 150 лет после того, как А. Левенгук увидел своих «зверюшек», английский ботаник Роберт Браун рассматривал в микроскоп пыльцу хвойных растений (он искал и нашел разницу между покрытосемянными и голосемянными семяпочками, что было большим открытием в ботанике начала прошлого века). Известно, что пыльца хвойных растений очень мелкая, и именно поэтому ему понадобился чрезвычайно мощный микроскоп.

Поместив под окуляр микроскопа каплю с пыльцой, Р. Браун с удовлетворением увидел пыльцу, но с удивлением обнаружил, что она медленно движется! Первой мыслью были «зверюшки» А. Левенгука, которые толкали изучаемую пыльцу. Но самих «зверюшек» не было видно. Что же тогда ее толкает? — задумался Р. Браун. Ведь не может же она двигаться сама, как сперматозоид (именно сперматозоид открыл А. Левенгук — это было его величайшее открытие в биологии — пример того, как новые технические средства позволяют делать открытия). А может быть — может? Ведь пыльца — это сперма растений! Нет, это было бы слишком невероятно! Да и не видно жгутика, с помощью которого она могла бы двигаться. Или это новая форма пыльцы, способная двигаться каким-то образом самостоятельно? Надо бы исключить все возможности ее движения из-за внешних факторов, и тогда...

Р. Браун был вдумчивым ученым, и, хотя движение пыльцы не мешало ее изучению, он поставил задачу объяснить странное движение. Именно это качество — объяснять не только то, что нужно объяснить, но и то, что не было нужно, — отличает настоящих исследователей. Не обрати он внимание на этот «малозначащий» факт, великое открытие задержалось бы.

Рассуждал Р. Браун примерно следующим образом. Прежде всего надо исключить влияние посторонних факторов. Ими могут быть невидимые «зверюшки» А. Левенгука. Надо их увидеть и тем самым обнаружить

причину движения пыльцы. Но для этого нужен еще более мощный микроскоп, которого у Р. Брауна не было.

Проще было взять чистую воду, в которой не могло быть «зверюшек». Повторив опыт с дистиллированной водой, Р. Браун убедился, что ничего не изменилось, пыльца по-прежнему странно двигалась в разных направлениях без видимой причины.

И вот именно в этот момент Р. Браун принял главное решение в своей жизни — проанализировать: а как ведут себя в чистой воде другие тела (не пыльцевые)? Если и они движутся, то это движение не связано с пыльцой и имеет место явление более общего характера. Он нашел обломок кварца, внутри которого была заполненная водой полость. Вода попала туда миллионы лет назад. Ни о каких левенгуковских «зверюшках» здесь и речи быть не могло, как они малы ни были. Роль пыльцы здесь выполнили микросоринки, попавшие с водой в кварц давным-давно.

Затаив дыхание, Р. Браун настроил микроскоп на этот маленький пузырек воды, едва видный сквозь прозрачный кварц. То, что он увидел, поразило его еще больше — в мертвой воде двигались мертвые соринки!!! Это было похоже на чудо! Очки Р. Брауна вспотели... Он не был очень религиозным человеком, но тут вспомнил какую-то цитату из Библии, засевшую еще с детства, о том, что божий помысел может двигать все, что угодно, и улыбнулся. Едва ли богу есть дело до микроскопических соринок в этом куске кварца, подумал он, и усмехнулся, так как не сомневался, что соринки двигались все это время.

Значит, только сама вода может двигать соринки?

Со скрупулезностью настоящего ученого Р. Браун стал изучать новое явление, фиксируя положение соринки через одинаковые интервалы времени. Он убедился, что движения соринок совершенно хаотические, что с ростом температуры воды они движутся более интенсивно и... хаотически, что со временем это движение не замирает. Последнее свойство беспокоило Р. Брауна больше всего — уж слишком не похоже это на привычные представления о движении. Ведь всякое движение со временем замирает, истощив свой запас энергии. А здесь миллионы лет соринки метались в случайном танце!

Все это было очень непривычно, и Р. Браун послал письмо в Лондонское королевское общество, где тщательно описал замеченное им явление. Это было в 1827 году.

Так было сделано еще одно величайшее открытие — открытие броуновского движения (правильней сказать брауновского, но в это время влияние латыни заставляло английское Broun читать как Броун, тогда как сами англичане его называют Брауном. Кстати, именно из-за этого London мы называем Лондоном, а англичане — Ландоном).

Любопытно, что открытие Брауна не было оценено современниками. Движение частиц приписали тепловым микротечениям жидкости, и... доклад Брауна положили на далекую полку. Там он пролежал почти семьдесят лет, пока А. Эйнштейн не заинтересовался возможностью экспериментального подтверждения атомного строения вещества. Именно он обнаружил эксперимент, поставленный три четверти века назад, и ввел понятие броуновского движения, подтверждающего атомное строение жидкости.

Точное определение броуновского движения таково: это «...беспорядочное движение малых (размером в несколько микрон и менее) частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием толчков со стороны молекул окружающей среды» (БСЭ, т. 4, с. 57).

Здесь, к сожалению, не сказано самое главное, что броуновское движение *случайно*! Эта случайность образуется естественным образом в результате толчков молекул среды, положение и скорость которых нам неизвестна. Если говорить строго, то случайность броуновского движения образуется по модели № 1, рассмотренной выше, то есть в результате отсутствия информации о движении молекул среды.

Что это за информация? Каков ее объем хотя бы приближенно? Расчеты показывают, что частица размером в один микрон (10^{-4} см) испытывает более 10^{15} ударов в секунду со стороны окружающих ее молекул, что означает, что для того, чтобы вычислить движение этой частицы в течение одной секунды, надо измерить параметры 10^{15} ударов. А это очень много! Даже слишком много!

Именно поэтому движение частицы мы вправе считать случайным. Такое решение сразу открывает новые возможности по описанию свойств броуновского движения, что впервые в начале этого века сделано А. Эйнштейном.

Нельзя предсказать траекторию броуновской частицы, но свойства этой траектории — можно. Зафиксируем ее положение в исходный момент. Тогда согласно теории среднее расстояние, на которое уйдет частица за время t,

пропорционально $\sqrt{tT^\circ}$, где T° — абсолютная температура среды, в которой находится частица.

Это означает, что при увеличении времени наблюдения за частицей в 4 раза, она уйдет на расстояние не в 4, а лишь в 2 раза больше. Следовательно, броуновское движение — это медленное движение!

Его средняя скорость пропорциональна $\sqrt{T^\circ}$, то есть она может быть увеличена путем подогревания среды. При $T^\circ=0$, то есть когда температура среды равна абсолютному нулю, броуновское движение замирает. Как видно, тепло является источником броуновского движения. Именно поэтому такого рода случайные процессы называют тепловыми шумами. Почему шумами?

Да потому, что они накладываются, как городской шум, на любое явление, происходящее при этой температуре.

Известный физик Р. Фейнман сравнивал броуновское движение частицы с движением пьяного моряка, который выходит из бара и делает несколько шагов, но плохо держится на ногах и каждый шаг делает куда-то в сторону, случайно. В соответствии с описанным свойством броуновского движения ему трудно далеко уйти от бара. Если за первую минуту он уйдет в среднем на 20 метров от бара, то за следующую минуту это расстояние увеличится лишь на 8 метров, а за третью — только на 6 метров, четвертую — 5 метров и т. д. Может быть, поэтому так велика концентрация пьяных матросов в районе бара! Но не будем винить в этом А. Эйнштейна, хотя приведенные результаты расчетов сделаны по его формуле.

Случайность, порожденная тепловыми явлениями, значительно интенсивнее, чем случайность, порожденная соотношением неопределенностей (модель № 3). Действительно, тепловая случайность проявляется уже для микронных частиц в броуновском движении (это объекты размером 10^{-4} сантиметра), а квантово-механическая — на объектах в миллион раз меньших. Именно поэтому можно считать, что интенсивность тепловой случайности, грубо говоря, в миллион раз больше, чем квантово-механической.

Белый шум в черном ящике (Модель № 5)

Нам в жизни редко приходится сталкиваться с самим броуновским движением, так сказать, в чистом виде. Значительно чаще тепловые шумы вторгаются в нашу жизнь

в виде помех при радиоприеме. Настройте ваш радиоприемник на какую-нибудь далекую и не очень мощную станцию. Почти наверняка вместе с передаваемой информацией вы услышите еще и шипение, похожее на шипение примуса. Если при этом отключить антенну, то будет слышно только шипение. Это собственный шум вашего приемника. (Особенно хорошо он слышен и виден в телевизоре при прекращении передачи.)

Электронный шум (будем называть его так) образуется в результате беспорядочного движения электронов в схеме. Ведь свободные электроны в металле образуют нечто вроде газа (его в классической физике так и называют «электронным газом»). Электроны этого газа двигаются беспорядочно, сталкиваясь друг с другом. В результате хаотического движения возникают их случайные скопления, где плотность электронов возрастает, и разрежения. Это приводит к крошечным локальным изменениям электрического поля, что вызывает разность потенциалов и ничтожные толчки электрического тока (ведь электрический ток порождается разностью потенциалов).

Так из хаотического движения электронов возникает электрический ток. Он очень мал, порядка микровольт (10^{-6} вольта), все время меняет направление и имеет ярко выраженный случайный характер.

Всякий сигнал можно представить в виде суммы синусоидальных колебаний разной частоты. Так вот, тепловой электронный шум содержит колебания всех частот. Процесс, обладающий таким свойством, называют «белым шумом» (по аналогии с белым цветом, содержащим все цвета).

Дело здесь в том, что хаотическое движение электронов приводит к случайному увеличению их плотности в какой-то одной области и уменьшению — в другой. Очевидно, что мелкие флуктуации плотности бывают чаще, чем большие. Они дают малые всплески электрического тока, а крупные — большие. Энергия колебаний тем больше, чем больше их амплитуда и частота. В результате энергия колебаний оказывается одинаковой на всех частотах. Это и есть основное свойство белого шума!

Итак, тепловой шум является белым шумом. И именно поэтому от него трудно избавиться. Действительно, легко отфильтровать помехи с известными частотными свойствами. А если эти частоты все, то надо их все и

фильтровать! В том числе отфильтруется и полезный сигнал. Как видно, выделяя полезный сигнал, мы всегда выделим его с «кусочком» белого шума, Эта неистребимость белого шума сделала его печально-знаменитым явлением нашего мира.

Так как тепловой шум порождается в любом проводнике и полупроводнике, то любое электронное устройство шумит. Именно этот шум в телевизоре мы слышим как шипение динамика и видим в виде поземки на экране, когда передачи нет.

Более того, эффективность, качество, классность электронного устройства характеризуются уровнем тепловых шумов. Хорошее устройство шумит мало, но все равно шумит. Величина теплового шума зависит от скорости движения электронов, которая определяется температурой прибора. Здесь есть железная связь, свойственная броуновскому движению: чем больше температура, тем выше уровень тепловых шумов. Это и позволило шумы измерять... градусами температуры по абсолютной шкале Кельвина. При абсолютном нуле шумов нет. Жаль, что суровая действительность запрещает возможность получить такую температуру. Этот запрет столь почетен, что его иногда называют третьим началом термодинамики, вслед за первым — о невозможности получения энергии из ничего, и вторым — о невозможности ее преобразования без потери тепла.

Поэтому, чтобы практически понизить этот шум, надо сильно охладить схему, что часто и делается путем ее погружения в жидкий гелий, температура которого равна 4° К (абсолютной шкалы). Электрические шумы при этом снижаются почти в 100 раз по сравнению с шумом при нормальной температуре.

Как видно, белый шум в черном ящике электронного устройства, который до сих пор нас волнует, является родным братом броуновского движения, открытого ботаником Р. Брауном в первой трети прошлого века.

Детерминированная случайность (Модель № 6)

Не правда ли, нелепое сочетание слов подзаголовка, как деревянная железка! Но тем не менее такая случайность существует.

И появилась она из сугубо практической необходимости — создания надежного датчика случайных чисел. Такие числа очень нужны при эксплуатации современ-

ных ЭВМ, решающих задачи моделирования (их мы рассмотрим подробно в третьей главе). Причем качество моделирования зависит от качества случайных чисел. Они должны быть «хорошими».

Вначале, когда возникла необходимость в таких числах, обратились к так называемым физическим датчикам случайных чисел, использующих электронный шум или радиоактивный распад. Для этого электрический сигнал, изменяющийся под действием электронного шума или радиоактивного распада, записывался в одну из ячеек памяти ЭВМ. В каждый конкретный момент содержимое ячейки было случайным и ЭВМ черпала случайные числа из этой ячейки по мере необходимости.

Всем хороши физические датчики, но каждый из них обладает каким-то досадным недостатком из-за их «физичности». Например, электронный шум не может быть надежным источником случайности, так как его свойства изменяются (вспомним, как влияет температура на уровень электронного шума). Радиоактивный распад не подвержен действию среды, но изменяется со временем (вспомним понятие: период полураспада) и требует специальной защиты персонала от радиации.

И, наконец, все физические источники случайности не обладают очень важным для ЭВМ свойством повторимости. Очень часто при работе ЭВМ надо повторить какой-то кусок вычислений (например, для проверки, не была ли сделана ошибка). Если при этом использовался физический датчик случайных чисел, ни о каком повторении речи быть не может!

Все это заставило искать новые способы генерации случайных чисел в ЭВМ. И такие способы были найдены.

Основная идея заключалась в том, чтобы составить программу датчика таких случайных чисел, которые не зависели бы от среды и времени и были бы воспроизводимы любое число раз. Ведь ЭВМ — это программируемый автомат, и, как говорят, сам бог велел воспользоваться этой ее особенностью. И такие программы были составлены. В их основу были положены соответствующие алгоритмы. Рассмотрим один из них — простейший.

Его идея состоит в последовательном преобразовании полученного на предыдущем шаге числа в другое и т. д. (Такой процесс называется рекуррентным.) Для этого достаточно умножить полученное ранее число на заданное большое и взять дробную часть от результата. Пусть заданное число равно $a=15,783$ (по сравнению с едини-

цей это большое число), а исходное $x_0 = 0{,}5$, тогда первое случайное число (x_1) равно дробной части произведения $ax_0 = 7{,}8915$, то есть $x_1 = 0{,}8915$. Второе число получаем как дробную часть произведения $ax_1 = 15{,}783 \cdot 0{,}8915 = 14{,}07054$, то есть $x_2 = 0{,}07054$ (сохраняем 5 знаков после запятой). Далее x_3 равна дробной части ax_2, эта дробная часть равна 0,11333 и т. д.

Легко написать общую формулу для вычисления чисел (ее и называют «датчиком»):

$$x_i =]\, ax_i [\;,$$

где вывернутые прямые скобки обозначают процедуру выделения дробной части числа, попавшего в эти скобки. Применяя эту формулу, можно получить последовательность чисел x_0, x_1, x_2, ... x_n.



В таблице приведены первые двадцать значений этих чисел для $a=15{,}783$, которые может получить каждый с помощью карманного калькулятора:

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_i	50	89	07	11	78	46	35	66	46	26

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
14	23	74	71	33	31	02	40	33	25	94

(здесь приведены лишь две цифры после запятой, но расчет велся с точностью до десяти знаков). Если показать эту таблицу любому специалисту по выявлению закономерностей (но не говорить, откуда она появилась), он в ней не найдет ни малейшего отклонения от равномерных случайных чисел. Самая стро́гая проверка этой короткой последовательности подтвердит лишь одну версию — о ее случайном характере.

Но ведь эта последовательность однозначно определяется формулой «датчиком» и двумя числами a и x_0. Это строго детерминированная последовательность вычисляется на сколь угодно много шагов вперед. Считать ее случайной (в смысле: непредсказуемой) никак нельзя. В чем здесь дело?

Такие последовательности называют псевдослучайными. Они, не будучи случайными, ведут себя как случайные, то есть все характеристики псевдослучайных последовательностей почти совпадают с характеристиками случайных.

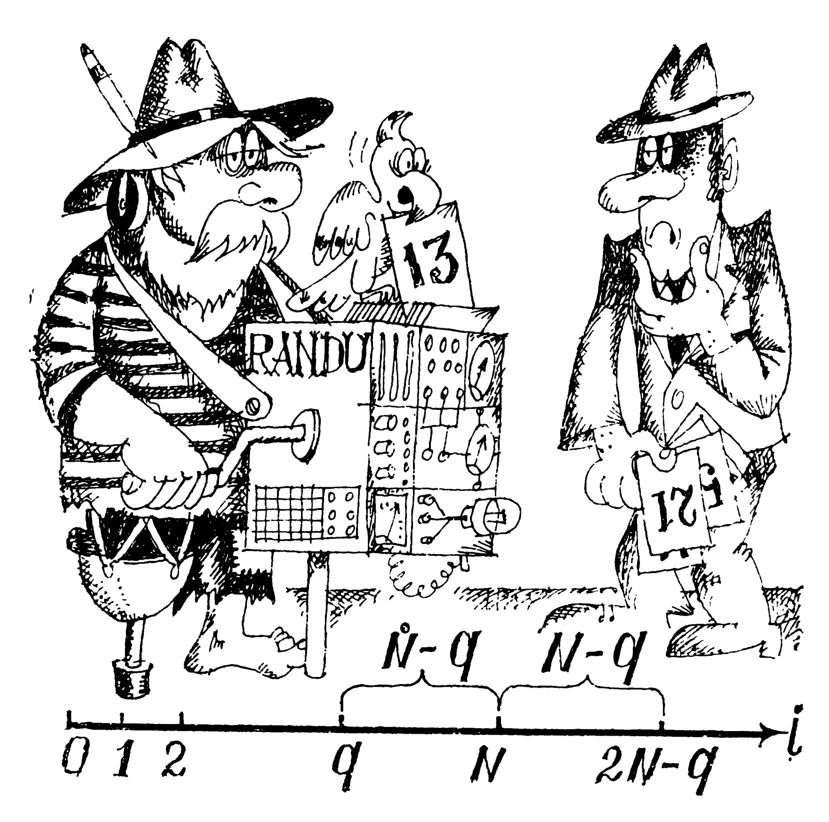
Здесь сказано осторожное «почти». Что это значит? А то, что числа в этой последовательности обладают двумя недостатками, которые не позволяют полученную последовательность считать чисто случайной, — она чуть «подпорчена», что можно выяснить, лишь обработав большой ее кусок (если, разумеется, не знать формулы «датчика», порождающей эту последовательность).

Это «чуть» состоит в следующем. Во-первых, не все числа последовательности независимы от предыдущих.

В этом легко убедиться, если представить, что на каком-то N-м шаге получено очень малое число x_n. Тогда следующее число x_{n+1} будет наверняка тоже мало и равно ax_n, то есть в a раз больше. Это явная зависимость двух соседних значений нашей последовательности.

Но этот недостаток не так важен, поскольку проявляется лишь при очень малых x_n, что бывает достаточно редко. Другой недостаток значительно серьезней. Он состоит в том, что наша последовательность с некоторого момента начинает повторять один свой кусок — его называют циклом. Причина этому очевидна.

Это ось номеров чисел, генерируемых с помощью нашего правила (впрочем, и любого другого, аналогичного этому). Отличительной чертой здесь является неизбежное повторение чисел начиная с N-го, причем величина цикла равна $N—q$. Хороший датчик случайных чисел дает большое значение числа N.



Действительно, наша последовательность чисел устроена так, что каждое последующее число вычисляется из предыдущего. И если на каком-то N-м шаге будет получено, например, исходное число x_0, то дальше в соответствии с формулой «датчиком» будут получены x_1, x_2 и т. д. ...до опять-таки x_0, после чего этот цикл повторится снова, затем снова и опять снова... Очевидно, что то же самое произойдет, если в процессе вычислений на N-м шаге встретится любое из предыдущих чисел (например, q-е). Тогда цикл начнется с этого q-го — числа (x_q). Легко видеть, что величина цикла равна $N-q$. Это проиллюстрировано на рисунке на стр. 24, где представлена ось номеров i последовательности. Цикл величиной $N-q$ чисел повторяется после N-го числа с «железной» неизбежностью.

Величину N называют числом апериодичности. Она характеризует «добротную» часть последовательности до повторения ее чисел. Все числа до N в этой последовательности разные. Очевидно, что датчик случайных чисел можно считать хорошим только тогда, если величины N и периоды $N-q$ достаточно велики.

Эти величины прежде всего зависят от разрядности ЭВМ, на которой ведутся вычисления. Чем больше число разрядов, тем больше величины N и $N-q$.

Создатели датчиков случайных чисел, конечно же, стараются сделать их так, чтобы числа эти были бы как можно больше. И часто в погоне за большим циклом забывают о другой важной характеристике датчика — зависимости между случайными числами (точнее, независимости). Иногда это обнаруживается слишком поздно...

Лет десять назад три дотошных математика исследовали свойства датчика случайных чисел для одной из самых распространенных серий машин, называемой «Системой-360», американской фирмы IBM (читается: Ай-би-эм). Эта фирма считается крупнейшей в мире по разработке, производству и эксплуатации вычислительных машин. Этот датчик назывался RANDU (Rand по-английски — случай) и входил в пакет программ для научных расчетов, прилагаемых к «Системе-360». Разработчики датчика RANDU добились периода 2^{31}, то есть более миллиарда — это очень много. Но... при этом упустили, что датчик выдавал очень зависимые случайные числа, что и выявили математики, которые закончили свое исследование грустными словами: «Поскольку RANDU почти

несомненно применялся пользователями «Системы-360», то мы серьезно сомневаемся в результатах большого числа моделирования. И мы настоятельно призываем вас не использовать RANDU!»

Эти отчаянные призывы, увы, прозвучали с большим опозданием, так как датчик использовался во всем мире уже с 1960 года, и за это время огромное число расчетов и следующих за ними решений были приняты на основе никуда не годного датчика случайных чисел. Трудно оценить ущерб, нанесенный этой ошибкой (зависимые случайные числа считались независимыми), так как неудачные решения наверняка «списывались» на другие возможные причины (сбой ЭВМ, неправильная постановка задачи и т. д.). Но почти наверняка стоимость этой ошибки превысила стоимость той печально знаменитой ошибки в программе вывода на орбиту космической ракеты, «благодаря» которой ракета сбилась с курса и ее пришлось взорвать. Стоила эта ошибка столько же, сколько стоит экспериментальная космическая ракета, — несколько миллиардов долларов.

Читатель может возразить, что, мол, нельзя сравнивать конкретные миллиарды от потери экспериментальной ракеты с сомнительными потерями от плохого датчика случайных чисел. Действительно, в последнем случае потери учесть трудно, но можно. И дело здесь в том, что программу RANDU использовали наверняка много миллионов раз и столько же раз она давала небольшую, но реальную ошибку, которая и наносила ущерб, помноженный на миллионы обращений к этому самому RANDU. Это и есть плата за незнание свойств случайности!

Случайность из неустойчивости (Модель № 7)

Для обсуждения этой модели случайности следует сначала рассмотреть, что такое неустойчивость. Это, как легко догадаться, отсутствие устойчивости. А устойчивость является одним из самых привлекательных свойств нашего мира, которую можно определить как независимость результата от небольших изменений исходных условий. Это означает, что, изменяя немного исходные предпосылки, мы почти не изменяем окончательного результата.

Например, отклонив маятник и отпустив его (исходное условие), мы через некоторое время убедимся, что он остановился, — это окончательный результат, который

не зависит от того, как мы предварительно отклонили маятник. Изменится лишь его движение, результат же будет одним и тем же. Это пример устойчивой системы. Если в оси маятника будет сухое трение, то угол, в котором остановится маятник, будет зависеть от его исходного положения, но незначительно. Это тоже устойчивая система.

А вот если ось маятника при этом вращается, то в одном случае он остановится в отклоненном состоянии, а при определенных начальных условиях (например, при толчке в сторону вращения оси) и при малом весе груза он может начать вращаться со скоростью вращения оси. Это уже проявление неустойчивости. Действительно, в этом случае конечный результат (остановка маятника или его вращение) зависит от начальных условий.

Именно такие неустойчивые системы и порождают случайность. Рассмотрим одну из наиболее распространенных моделей неустойчивости, порождающей случайность...

...Газ Лоренца

Известный голландский физик X. Лоренц, создатель электронной теории, в начале этого века предложил модель, которая и получила впоследствии наименование газа Лоренца.

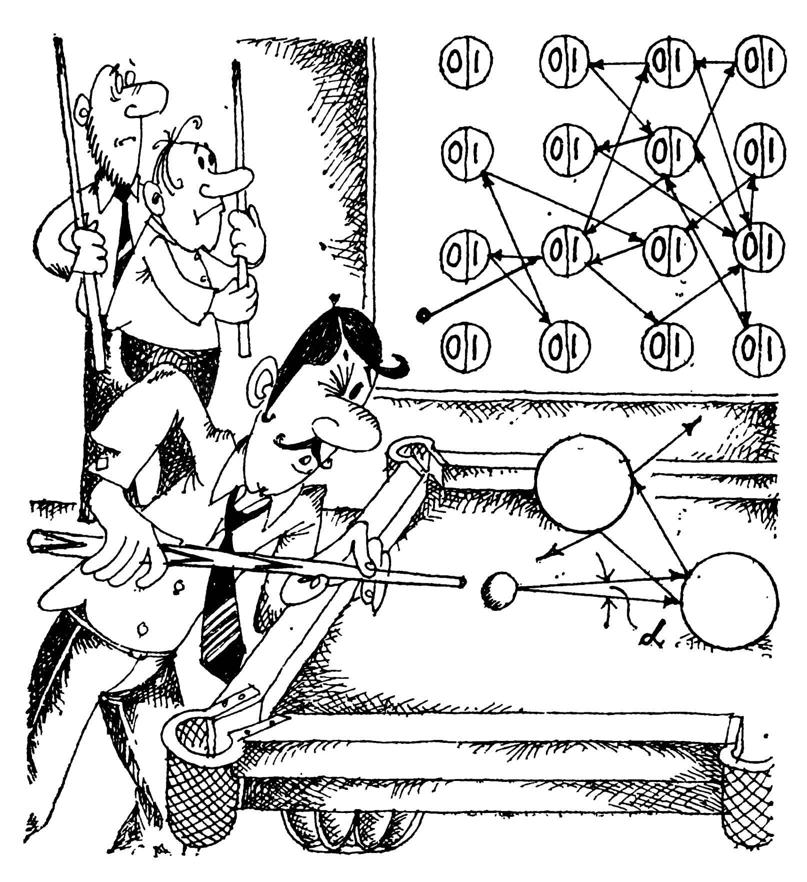
Представим себе, что на плоскость набросано большое число кружков (их называют рассеивателями). Каждый из этих кружков отражает все от своей поверхности по известному принципу: угол падения равен углу отражения. Это и есть основа модели двухмерного газа Лоренца (трехмерная модель составлена из шаров-рассеивателей). Если в такую среду, состоящую из кружков-рассеивателей, запустить точку, движущуюся с постоянной скоростью, то она начнет «натыкаться» на кружочки и отражаться от них. Ее движение при этом будет моделировать движение молекулы реального газа. Траектория, которую будет описывать эта точка, весьма затейлива. И эта затейливость связана с ее неустойчивостью, то есть с сильной зависимостью результата от начальных условий.

На стр. 28 показан кусок такой траектории. Хорошо видно, что при изменении вектора исходной скорости на малый угол α после всего двух отражений траектория изменяется очень сильно. Сколь угодно ни был бы мал угол α, траектории разойдутся очень быстро после нескольких отражений от кружков-рассеивателей.

Этот эффект хорошо знают опытные игроки в бильярд. Самыми сложными ударами (и эффектными) у них являются удары через шар, то есть умение попадать в лузу третьим шаром. Удары через два шара в бильярде не используются ввиду того, что движение четвертого шара предвидеть уже невозможно. Именно это обстоятельство и определяет «затейливость» движения частицы среди кружков-рассеивателей.

В таких неустойчивых системах как бы происходит быстрая «потеря памяти» о начальных данных. Всякая

Даже небольшое (на угол α) отклонение траектории движения точки газа Лоренца приводит к очень большому расхождению траектории уже после двух «отскоков» от рассеивателей. Это и является причиной чрезвычайно быстрого «забывания» предыстории и... к случайному движению точки.



динамическая система имеет такую память. Но у одних она долгая, как, например, у артиллерийского снаряда. Ведь именно наличие такой памяти позволяет артиллеристам попадать в цель. Они хорошо знают, что, немного изменив положение ствола, можно несколько изменить траекторию снаряда и, следовательно, точку его попадания. Такая система с долгой памятью о начальных условиях ближе к устойчивой, хотя, строго говоря, таковой не является.

Неустойчивая система типа газа Лоренца имеет короткую память о начальных условиях, что и приводит к... случайности (вот и произнесено слово, ради которого приведено описание модели Лоренца). Траектория движения материальной точки в этой модели совершенно случайна и напоминает движение броуновской частицы. Разница здесь лишь в том, что броуновское движение определяется движением тяжелой частицы под действием легких молекул жидкости, а в модели Лоренца описывается движение легкой частицы, отражающейся от «тяжелых» рассеивателей. И хотя ее траектория строго предопределена, ведет она себя как броуновская частица.

На рисунке на стр. 28 показана одна из траекторий частицы газа Лоренца. Говоря строго, она отличается от траектории броуновской частицы хотя бы тем, что наименьший пробег точки не может быть меньше расстояния между рассеивателями. Но тем не менее эта траектория, детерминированная исходным направлением движения точки и положением рассеивателей, так же случайна, как траектория броуновской частицы.

Если эту траекторию закодировать последовательностью из нулей и единиц так, что ноль соответствует отражению от левой половины кружка, а единица — от правой, то получим последовательность: 010101000010101... свойства которой ничем не отличаются от свойств последовательности, образуемой в результате подбрасывания монеты, где 0 соответствует гербу, а 1 — цифре.

Итак, модель Лоренца порождает случайность, не будучи случайной сама по себе. И причиной этому является неустойчивость траектории точки, отражающейся от рассеивателей.

Этот странный «странный аттрактор»

Через пятьдесят лет, в 1963 году, появилась работа другого Лоренца — американца Э. Лоренца (он не имеет

никакого отношения к знаменитому Хендрику Лоренцу). Этот Лоренц, будучи метеорологом, исследовал движение атмосферы под действием солнечного тепла. Модель, построенная Э. Лоренцем, была очень проста. Он описал математически движение атмосферы, на которую действуют два фактора: нагревание от земли и охлаждение в верхних слоях. Известно, что в результате нагревания воздух расширяется и поднимается вверх, вытесняя холодный, который опускается. Образуется своеобразная вертикальная «карусель».

Э. Лоренц составил математические уравнения, описывающие движение этой карусели. Представьте себе замкнутую О-образную трубу, которая снизу нагревается, а вверху охлаждается. Легко заметить, что при заполнении водой эта схема соответствует широко распространенной системе центрального отопления сельского дома. Ее преимущество заключается в том, что не нужно насоса для прокачки горячей воды через батареи, так как вода сама движется по кольцу за счет «всплывания» горячей и «утопания» холодной воды. Это водяное «колесо» будет «крутиться» все время, пока есть перепад температур, причем направление его «вращения» зависит от начального толчка.

Это никого не удивляет. Удивительно другое. Оказывается, что при определенной, достаточно большой, температуре наше водяное колесо начинает менять направление вращения. Сделав несколько оборотов в одном направлении, оно в какой-то момент времени начнет вращаться в другом, потом снова сменит его и т. д.

Природа этого явления достаточно проста. При больших перепадах температур скорость движения жидкости будет тоже большой и она не успеет охладиться в верхней части, чтобы опускаться, и начинает «всплывать» раньше времени, что затормозит вращение. В результате вращение начинается в другом направлении и т. д.

Если зафиксировать моменты времени, когда происходит смена направления вращения такого водяного колеса, то эта последовательность будет вести себя как случайная, то есть никак нельзя заранее предвидеть момент смены направления вращения. Но самым интересным оказалось то, что так же ведет себя решение уравнений, описывающих этот процесс (в этом и состоит открытие Э. Лоренца — решение строго детерминированной системы уравнений порождает случайность).

Специфика этого явления заключается в том, что оба

движения водяного колеса — по и против часовой стрелки — неустойчивы при высокой температуре нагревателя. В результате это колесо дергается в разные стороны, причем это дерганье имеет сугубо случайный характер, то есть моменты смены направления вращения случайны. Если эти моменты отметить на оси времени, то получится картина, очень похожая на случайный поток клиентов парикмахерской.

Такое движение от одного неустойчивого движения к другому и получило название «странный аттрактор» (от английского attract — притягивать, привлекать). Действительно странно, что неустойчивое движение водяного колеса в виде его вращения в одну сторону все же реализуется на некоторое время с тем, чтобы смениться на другое, тоже неустойчивое.

Этот феномен в свое время поразил всех. И было чему удивляться. Вполне детерминированная динамическая система сама, без всяких внешних воздействий, порождала случайность! Тут было о чем призадуматься. Но вскоре поняли, что это не что иное, как все та же детерминированная случайность, модель которой была рассмотрена в виде датчика псевдослучайных чисел чуть раньше (см. модель № 5). И там и здесь эффект быстрого забывания начальных условий приводит к случайности поведения системы.

Любопытно, что этот вывод приводит к весьма прискорбным последствиям относительно перспектив на прогноз погоды. До работ Э. Лоренца считалось, что точность прогноза зависит лишь от объема и точности исходной информации. Чем больше мы знаем о погоде сегодня, тем точнее будет прогноз на завтра, послезавтра и т. д. по принципу лапласовского детерминизма, что настоящее состояние Вселенной вообще и погоды в частности является следствием ее предыдущего состояния.

Именно здесь дает трещину лапласовский детерминизм, поскольку настоящее состояние Вселенной является следствием еще и случайного фактора, вызванного механизмом забывания начальных условий, который, в свою очередь, определяется неустойчивостью (точнее, странной устойчивостью — странным аттрактором). А отсюда следует грустный вывод о том, что длительные точные прогнозы невозможны в принципе из-за присутствия этих самых странных аттракторов, вносящих неизбежную случайность, которой уже дали поэтическое название «каприз погоды». Об этом следует помнить, когда в очередной

раз вопреки прогнозируемой ясной погоде будет дождь, и пожалеть синоптиков, которым приходится предсказывать погоду при наличии этих страшных «странных аттракторов».

$N+1$-ю модель случайности мы предоставляем сконструировать самому читателю. Наверняка он сможет это сделать без большого труда, ведь так часто ему приходится досадовать или радоваться случайно, и осмысливание источников таких случайностей дает новые модели случайности.

Предыдущие модели показали, что случайностей в нашем мире много, даже слишком много. Случай проявляется в самых неожиданных местах и разных ипостасях. Природа случайности разнообразна настолько, что трудно найти явление, которое бы не несло в себе хоть самую малость случайности. Обнаружилась она даже в математических уравнениях, порождающих странный аттрактор.

Уж так устроен наш трижды случайный мир, не нами он создан и не нам его осуждать за это. Тем более что мы неплохо приспособились жить в нем. В процессе этого приспособления человечество выработало эффективные методы борьбы со случайностью, которую в данном случае называют помехой. На худой конец есть много методов смягчения негативных последствий урагана случайностей, ежеминутно обрушивающихся на нашу голову. Мы уже привыкли к этому и строим свое поведение так, чтобы парировать неизбежные их действия.

Так, например, существуют целые науки, скажем, математическая и прикладная статистики, которые разрабатывают методы принятия правильных (точнее, почти правильных) решений в обстановке, зашумленной случайными факторами — помехами, то есть, грубо говоря, рецепты, как действовать хорошо на основе плохих данных.

Все эти ухищрения и уловки направлены на одно — как-то преодолеть негативные последствия случайности нашего мира. А для этого нужно знать свойства случайности как таковой, безотносительно к механизму ее происхождения.

Каковы же эти свойства случайности?

«Хорошая» и «дурная» случайность

Сама по себе случайность не может быть ни «хорошей», ни «дурной», как не может быть таковым любой предмет или явление. Именно поэтому взяты в кавычки

эти прилагательные. Наши эмоциональные оценки случайности начинаются с того момента, когда мы пытаемся связать случайность со своей жизнью (или она сама вторгается в нашу жизнь). И в зависимости от того, набили ли при этом себе шишки или получили что-то приятное (например, выигрыш в спортлото), мы начинаем квалифицировать случайность по мере удовольствия или неудовольствия, нанесенного ею.

Но в науке такие эмоциональные оценки неприемлемы, хотя (увы!) встречаются (ведь ученые тоже люди, и им так же свойственны человеческие недостатки и заблуждения, как и всем остальным. Но при этом ученый никогда не будет аргументировать своими эмоциями по принципу: «Это так, потому что мне это нравится»).

Рассмотрим случайность глазами объективного исследователя, которому чужды эмоциональные оценки и который служит в науке только истине. Если такому строгому ученому тем не менее задать провокационный вопрос — бывает ли «хорошая» или «дурная» случайность, то он немедленно ответит с энтузиазмом: «Есть! Есть! Еще как есть!»

Это тоже эмоциональная оценка случайности, но совсем другого толка. Здесь эмоции вызваны только научными соображениями — стремлением создавать достоверные модели изучаемых явлений. С этой точки зрения «хорошей» следует назвать ту случайность, которая позволяет построить ее модель. «Дурная» же случайность не дает возможности этого сделать (ведь дурно все, что препятствует нашему знанию, отражаемому в моделях).

Итак, есть «хорошая» и «дурная» случайность, и прежде всего это связано с тем, что «хорошая» случайность подчиняется определенным закономерностям (их называют стохастическими или вероятностными закономерностями), а «дурная» — никаким (поэтому в порыве оправданного гнева ее и назвали «дурной»).

Например, подбрасывание монетки дает нам «хорошую» случайность. О ней можно многое сказать. Во-первых, вероятность выпадения герба равна $^1/_2$, цифры — тоже $^1/_2$. Во-вторых, результаты двух подбрасываний не зависят друг от друга. (Любопытно, что это свойство не столь очевидно и многие ошибочно считают, что результат зависит от предыстории подбрасывания. Так, например, при выпадении подряд несколько раз герба кажется,

что вероятность выпадения цифры при следующем бросании увеличивается и, следовательно, становится больше $^1/_2$. Нет, она не изменяется — таков закон этой случайности. Не верите? Проверьте экспериментально. Хотя делать это, мягко говоря, неразумно!)

Итак, эксперимент с подбрасыванием монетки дает нам «хорошую» случайность, в которой есть четкие закономерности, которые можно использовать для ее анализа и моделирования. Это добропорядочная случайность, с ней легко и приятно иметь дело, она признана наукой, и наука много и плодотворно занимается ею, выделив целый раздел — теорию вероятностей. А «дурная»?

Здесь нет никаких закономерностей. Примеров такой «дурной» случайности очень много, даже, к сожалению, слишком много. Поведение всякого очень сложного объекта «зашумлено» именно такой «дурной» случайностью. Сколько раз вы чихнете завтра? Относительно этого случайного явления ничего определенного сказать нельзя, если, разумеется, не простудитесь или не займетесь уборкой пыли на книжных полках.

Как видно, эта случайность отличается от «хорошей» полной неопределенностью. Именно поэтому ее не рассматривают в науке или... подменяют «хорошей» случайностью, приписывая ей некоторые свойства. А что делать?

Строго же говоря, единственным свойством «дурной» случайности является отсутствие всяких свойств. Возможно ли такое? Существуют ли явления, относительно которых ничего нельзя сказать?

Не очень случайные случайности

Если «дурную» случайность можно назвать совсем случайной, то «хорошую» — не совсем, не полностью, так как она «подпорчена» определенными, вполне регулярными свойствами. Примером таких свойств являются свойства «иметь вероятность» и «быть независимой от предыстории» (вспомним пример с монеткой). Именно такого рода свойства и позволяют сносно сосуществовать со случайностью, то есть как-то предвидеть ее последствия с тем, чтобы эффективно парировать (известно, что последствия случайных явлений чаще оказываются печальными, и, встречаясь со случайностью, нужно быть готовым к неприятностям). Но как парировать? Для это-

го нужно воспользоваться известными свойствами случайности (если эти свойства нам неизвестны, то случайность становится «дурной» для нас). Зная свойства случайности, всегда можно так построить свое поведение, чтобы нейтрализовать или минимизировать ожидающие нас неприятности.

Сыграем в орлянку

Например, вам предложили игру, в которой вы платите две единицы стоимости, если выпадет герб, а ваш противник — одну единицу, если выпадет цифра, вы, разумеется, откажетесь. Эта игра невыгодна для вас, и ее невыгодность следует из свойства равновероятности выпадения герба и цифры. Именно знание этого свойства убережет вас от проигрыша. Это очевидно.

Так же очевидно, что игра, в которой ваш противник при угадывании получает от вас больше, чем расплачивается при ошибке, обидна для вас. Равновероятность появления обеих сторон монетки требует, чтобы выигрыш при угадывании и проигрыш при ошибке были бы одинаковы, то есть игра должна быть на равных. Иначе она будет несправедливой для одного из игроков (такие игры называют обидными).

А вот как можно обыграть своего неосведомленного противника при игре в орлянку (на равных, разумеется), если он не знает свойства независимости от предыстории, упомянутого выше. Предложите ему произвольно в любой момент повышать ставку, когда он этого захочет, но (как бы в уплату за это) потребуйте, чтобы его проигрыш, если он произойдет, был бы чуть выше. Например, после серии из пяти гербов ваш неосведомленный противник будет думать, что дальше с большей вероятностью выпадет цифра, и захочет повысить ставку с единицы до, например, пяти и получит эту пятерку при выпадении цифры. Но при выпадении герба он должен будет расплачиваться шестью единицами (на единицу больше пяти). В эти моменты вы будете выигрывать (в среднем, разумеется), поскольку в любой момент и герб и цифра выпадают равновероятно.

Здесь ваш выигрыш был связан с тем, что появились моменты игры не на равных, а в вашу пользу. Противник наказывался за свое незнание (или неумение применять) закона независимости положения монетки от предыстории игры.

А вот пример, как можно использовать знание законов случайности для выигрыша в спортлото. После выхода в «Эврике» своей первой книги «Этот случайный, случайный, случайный мир» автор получал много писем от читателей и некоторые из них с просьбой научить играть в спортлото. На каждое письмо я аккуратно отвечал, что результат в спортлото предсказать нельзя, ведь лототрон специально сконструирован так, чтобы появление любой цифры было бы равновероятным (недаром его работу подробно показывали по телевизору). И поэтому в спортлото нет выигрышной стратегии.

Теперь я должен признаться, что это не так. Такая стратегия есть! Я просто не догадывался о ней. И дело



здесь вовсе не в том, чтобы угадать, что выдает лототрон: этого сделать по-прежнему нельзя, как нельзя угадать положение монетки. И все-таки!

Как выиграть в спортлото

Идея выигрышной стратегии в спортлото заключается в следующем. При этой игре вы играете не против лототрона, а против всех, кто купил и заполнил карточки. И ваш проигрыш идет на оплату выигрыша тому, кто случайно угадал несколько цифр. Происходит лишь перераспределение общей суммы, вырученной за карточки (государство берет лишь часть на расходы по содержанию спортлото и на отчисления в спортивный фонд — почему и называют игру спортлото).

Поэтому если, например, только вы купили карточку, а никто другой их не покупал, то, даже угадав все шесть чисел, вы не получите ничего, ибо платить будет нечем. Если же все, кто купил карточки, отметили одни и те же числа и их же указал лототрон, то каждый игрок получит лишь то, что он затратил на покупку карточек (за небольшим вычетом).

Следовательно, настоящие выигрыши в спортлото могут быть при большом числе его участников и при разнообразной отметке цифр. Так и бывает. Как же отмечать цифры?

Ответ прост: отмечать надо так, как никто не отмечает. При этом вероятность выигрыша будет так же мала, как и во всех других способах зачеркивания номеров. Но зато при выигрыше вы получите очень большую сумму, поскольку все поставили не так и проиграли. И в соответствии с правилом спортлото их проигрыш стал вашим выигрышем.

Для того чтобы реализовать эту выигрышную стратегию (ставить так, как не ставят другие), нужно знать, как ставят другие. А как они ставят?

По-разному. Если это разнообразие велико, то можно его считать случайным.

Итак, случайно. Есть ли в этой случайности закономерности? Если их нет, то предложенная стратегия не стоит выеденного яйца. Действительно, если все числа в карточках зачеркиваются игроками равновероятно, то нельзя найти цифр, на которые не ставят или ставят меньше.

Все дело в том, что числа зачеркиваются игроками не равновероятно: есть «любимые» и «нелюбимые». К «любимым» относятся 7, 12, 21, дата рождения, номера дома, квартиры, телефона и т. д. К «нелюбимым»... Именно их-то и нужно узнать. Проще всего это сделать путем исключения «любимых» из общего количества чисел.

Как видно, выяснение таких чисел представляет задачу огромной сложности. Но допустим, что мы выявили числа, «не любимые» всеми. Эта нелюбовь выразится в том, что вероятность выбора этих чисел отклонится от $^1/_{49}$ в сторону уменьшения на доли процента. Соответственно на эти доли процента увеличится в среднем ваш выигрыш, если поставите на эти числа. А это не так много! Вот если бы были числа, на которые никто не ставил, то ваш выигрыш был бы фантастическим. Но таких чисел нет. Так что едва ли стоит тратить порох на поиск выигрышной стратегии в спортлото. Она существует, но дает очень мало.

Это лишь пример, как знание о свойствах процесса зачеркивания игроками чисел в карточках спортлото (который можно считать случайным) дает принципиальную возможность в среднем выигрывать даже при наличии такого случайного механизма определения выигрыша, каким является лототрон.

Психология азарта

Игра есть дитя матери-наживы и отца-случая. (Здесь наживу следует понимать в широком смысле: это и денежный выигрыш, и престиж в глазах окружающих и в собственных глазах — вот какой я молодец и т. д.) Если мы лишим игру одного из ее «родителей», она станет неинтересной. Именно поэтому во всякой игре обязательно есть платежи (и, соответтственно, выигрыши) и есть случайный механизм, определяющий результат игры, который реализуется по-разному: подбрасыванием монетки, бросанием кости, тасованием карт, движением шарика в рулетке и т. д. и т. д.

И, что, пожалуй, самое главное, игроками являются люди. Благодаря этому они по-разному оценивают результаты игры. Так, например, известно, что игрок под условным именем «бедняк» обычно преувеличивает значение выигрыша по сравнению с проигрышем. И это по-

нятно: он трудно зарабатывает и знает цену деньгам. Именно поэтому его поражает всякий выигрыш в сочетании с простотой его получения.

«Богач» же, наоборот, склонен преуменьшать роль выигрыша по сравнению с проигрышем. Это тоже легко объяснить, так как он часто выигрывал и не привык проигрывать (поэтому он и «богач»). «Осторожный» преувеличивает роль проигрыша и т. д.

Как видно, все игроки разные, и среди них нет ни одного «беспристрастного». В этой роли может выступать только автомат, а мы лишь только люди! Но автоматы не станут играть ни в одну игру — этим занимаются только люди, поэтому продолжим разговор об играх людей.

А теперь попробуем ответить на довольно коварный вопрос: кто же выигрывает при игре в орлянку? Как ни странно, но ответ «в среднем — никто» не является правильным.

Обидность безобидных игр

Игра в орлянку считается безобидной игрой, так как в каждой партии шансы у игроков одинаковы. И все-таки она обидна! Кто же выигрывает в этом случае?

Говоря строго, в этой игре выигрывает тот, у кого больше денег (если, разумеется, игра идет на наличные, а не в кредит). Действительно, выигрыш, как и проигрыш, здесь является случайной величиной и с одинаковой вероятностью может быть у обоих игроков на разных стадиях игры. Если бы оба игрока имели одинаковое количество денег для расчета, то их шансы были бы тоже одинаковы. Но если у одного денег больше, то вероятность его выигрыша будет больше. Это связано с тем, что вероятность проиграть в безобидной игре большую сумму меньше, чем вероятность выиграть маленькую. Поэтому и выигрывает «богач», а не «бедняк».

Теория показывает, что в случае, когда у одного игрока вдвое больше средств, чем у другого, шансов выиграть у него в два раза больше. И именно из-за этого существуют и процветают на Западе (и Востоке) всякого рода игровые заведения. Они имеют наличных средств больше, чем у любого клиента. Важно вызвать у клиента азарт (об этом заботится заведение), а об остальном позаботится случай, которым и пользуется «солидное» заведение. («Несолидные» пользуются еще и многими дру-

гими способами, не имеющими отношения к случайности, поэтому мы их и не рассматриваем.)

Покажем это на примере игры с «одноруким бандитом» — так называют игровой автомат с ручкой, с помощью которой его запускают для игры. Пусть этот автомат настроен на игру в орлянку. Тогда, бросив в щель монету и дернув за ручку автомата, вы запускаете случайный механизм, который с вероятностью $\frac{1}{2}$ вернет вашу монетку и добавит такую же свою (это ваш выигрыш) или с вероятностью $\frac{1}{2}$ заберет монетку (это ваш проигрыш). Легко заметить, что это игра безобидная, на равных. Однако...

Всякий игрок в такой ситуации рассчитывает, что он «сорвет куш» и уйдет до того, как снова его проиграет,— ведь выигрыш-то случаен! Можно подсчитать шансы игрока в этом случае. Вероятность удвоить исходную сумму — $\frac{1}{2}$, то есть шанс удвоить свой капитал и шанс уйти без гроша в кармане — одинаковы. А вот сорвать в игре куш в два раза больший, чем было первоначально в кармане, можно лишь с вероятностью $\frac{1}{3}$; $\frac{2}{3}$ шансов за то, что придется уйти с пустыми карманами! А если вы захотите получить в 10 раз больше, чем принесли, то вероятность этого события равна лишь $\frac{1}{10}$; и с вероятностью $\frac{9}{10}$ вы уйдете без гроша. $\frac{1}{10}$ — это много или мало?

Все зависит от того, к какому психологическому типу относится игрок. Если к азартному, то это много. И именно такие игроки в основном заполняют игровые заведения.

Большинство же клиентов «однорукого бандита» — «бедняки». И именно поэтому «бандит» прибылен для его владельцев.

Но все это игры. В играх, безусловно, отражаются страсти беспокойного человеческого существования, и многие важные практические задачи могут быть сформулированы как игры. Но не играми едиными жив человек. Суровая действительность заставляет нас обращать внимание на ситуации, далекие от игрового азарта. Такая

суровая, если не сказать трагическая, ситуация складывается при появлении трещин в ответственных конструкциях, поломка которых грозит аварией, а иногда и катастрофой с человеческими жертвами. Речь идет о трещинах в конструкциях транспортных средств — автомашинах, кораблях и самолетах. Особенно страшны трещины в самолетах.

Читатель, по-видимому, удивится: стоит ли говорить о трещинах в самолетных конструкциях? Ведь если их появление грозит катастрофой, то нужно немедленно снимать самолет с эксплуатации и ремонтировать его или сдавать в металлолом?

Если поступать так, то летать будет не на чем. Да, да! Нагрузки на конструкцию современных самолетов таковы, что появление трещин является обычным явлением. И бояться следует не трещин, а их развития до критической величины. Здесь и нужно знать законы их развития. Эти законы статистические.

Трещина — явление случайное

Появление трещин в конструкциях зависит от многих факторов. Прежде всего от микроструктуры материала конструкции и от нагрузок, которые испытывает эта конструкция. Ни того, ни другого заранее (или, как говорят, априори) узнать нельзя. Так, для выявления микроструктуры надо разрезать конструкцию, сделать из нее шлифы (отшлифованные кусочки металла) и посмотреть на них в микроскоп. Не лучше дело обстоит с нагрузкой конструкции самолета. Эта нагрузка зависит от умения пилота управлять при взлетах и посадках (особенно при посадках, когда нагрузки пиковые), от вибраций, создаваемых двигателем, состояния атмосферы во время эксплуатации и т. д. Предугадать все это заранее нет возможности. Впрочем, если даже предугадать всю будущую нагрузку самолета, неизвестной останется микроструктура материала конструкции.

Именно поэтому развитие трещины является случайным процессом, свойства которого можно определить. Остается следить за ее развитием и, зная эти свойства, определить момент, когда она достигнет критической величины. Именно в этот момент, не раньше и не позже, следует заменить поврежденный узел.

Здесь знание свойств случайного процесса развития

трещины позволяет указать, когда следует снова сделать осмотр и обмер трещины, но так, чтобы до этого срока трещина не превысила бы критическую величину, то есть чтобы не допустить катастрофы.

Вот так знание свойств случайности дает возможность экономно и эффективно эксплуатировать очень дорогую технику и не допускать катастроф.

Так или иначе, но знание законов случайности и ее свойств помогает преодолевать случайность, бороться с ней и если не уничтожать ее, то, во всяком случае, уменьшать неприятности от встреч с нею. Человечество далеко продвинулось на этом пути.

Но... (ради этого «но» и написана эта книга), но случайность далеко не всегда бывает негативной, плохой, досадной, трагической и т. д. и т. п. Иногда (часто и значительно чаще, чем нам кажется) случайность оборачивается к нам неожиданной стороной: случайной удачей, находкой, встречей, успехом, везением и т. д. Человек всегда отмечал такое проявление случайности, пользовался ею, но... почти никогда не рассчитывал на случайную удачу. Слишком уж зыбко основание: ведь случайность может быть, а может и не быть, на то она и названа случайностью. Планировать поведение в расчете на счастливую случайность всегда было связано с риском сесть в галошу. Именно поэтому всегда разумные планы опирались на реальный взгляд в будущее, где случайность может лишь повредить реализации плана, но уж никак не помочь его выполнению. И этот, безусловно, разумный подход всегда себя оправдывал, когда нужно было действовать наверняка. Но что значит «наверняка»? Так, например, можно ли планировать урожай следующих лет наверняка?

Разумеется, нет ввиду того, что действуют неизбежные случайности. Но, если мы можем предвидеть негативные случайности и учитывать их в наших планах, то почему же мы не планируем счастливые случайности? Ведь они нисколько не реже «посещают» нас, чем негативные!

Эти соображения и привели к тому, что к середине нашего века в науке сложился новый взгляд на случайность, который, говоря просто, сводится к следующему: не следует бояться случайности, надо смело идти ей навстречу и не страшиться возможных неудач (их почти всегда можно исправить), но зато широко пользоваться

огромными возможностями, которые она предоставляет. Эти возможности всегда неожиданны (случайны) и поэтому очень заманчивы.

На этом мы заканчиваем знакомство со случайностью и переходим к описанию способов ее использования. Эти способы уже широко применяются в науке, технике и народном хозяйстве. В их основе лежит мысль о том, что случайно вовсе не значит наобум, непродуманно или легкомысленно. Здесь случайность выступает как источник всех возможностей, как инструмент целенаправленного действия, позволяющего решать сложнейшие задачи, стоящие перед человечеством.

Итак, вперед, к овладению случайностью!



глава вторая.

СЛУЧАЙ ВО СПАСЕНИЕ (РАНДОМИЗАЦИЯ)

Нельзя объять необъятное.

К. Прутков

...И не целесообразно.

Этим тяжеловатым словом называют целенаправленный процесс введения случайности в нашу разумную деятельность. Произошел этот неологизм от английского слова random — случай и дословно может быть переведен на русский как «ослучаивание». Вместо этой неуклюжей труднопроизносимой конструкции в науке сначала как жаргонное, а потом как вполне корректное понятие осталось слово рандомизация.

Ослучаивание можно вводить по-разному. Именно поэтому рандомизация бывает различной. Так, можно вводить случайные числа в некоторые процессы с тем, чтобы получить какой-то положительный эффект. Примером такой рандомизации является использование в азартных играх генераторов случайности, таких, как рулетка, тасование карт, подбрасывание монетки, бросание костей и т. д.

Но можно поступить иначе. Можно ввести не саму случайность, а представление о ней. Сказав, что это явление случайно, мы тем самым рандомизируем его, то есть делаем случайным независимо от того, является оно случайным на самом деле или нет. К такого рода рандомизации люди прибегали уже давно, что было связано с трудностью познания нашего мира.

Немного общих размышлений

Прежде всего — что такое познание? Мы не будем приводить строгого определения из философского словаря — его можно прочесть, да оно нам и не нужно во всей его философской полноте. Для нашего разговора о случайности достаточно рассмотреть лишь один из аспектов познания — создание моделей познаваемого явления.

Сам по себе процесс познания человеком окружающего его мира является чрезвычайно сложным и многоаспектным. Тут и исторические, и социальные, и психологические, и многие другие факторы, определяющие его специфику. Их мы рассматривать не будем.

Ограничимся упрощенным представлением о познании как процессе создания моделей изучаемых явлений.

Здесь понятие «модель» используется в широком смысле как некое высказывание (на любом языке — естественном, графическом, аналитическом и т. д.), с помощью которого можно судить о том, как ведет себя объект познания в той или иной ситуации.

Куда упадет брошенный рукой камень? На землю или уже не вернется? На собственном опыте и наблюдении опыта других лиц сложилось представление о поведении любого брошенного камня, позволяющее наперед утверждать, что любой камень упадет на землю; а это уже модель «поведения» бросаемых камней. Если расширить опыт, то можно сформировать и более обобщенную модель: все бросаемые предметы падают на землю, если, разумеется, их не запускать с космической скоростью. Углубляясь в исследование этого вопроса, мы придем к одной из фундаментальнейших моделей — закону всемирного тяготения.

Итак, знание фактов первично по отношению к знанию моделей. Но знание моделей более компактно и универсально, что более удобно для практического использования, чем знание фактов. Именно это отражает известная мысль о том, что нет ничего более практичного, чем теория, то есть система моделей.

В современной информатике (науке о хранении и переработке информации с помощью ЭВМ) это деление знания на факты и модели привело к созданию различных информационных банков. Факты хранятся в банках данных — это наиболее разработанный и широко используемый способ хранения информации. Пожалуй, самым распространенным примером банка данных является

банк под названием «кадры», и хранит он в памяти ЭВМ анкетные данные о всех сотрудниках предприятия или учреждения. С его помощью можно быстро и эффективно решать многие кадровые задачи, например, найти холостых слесарей не старше 30 лет для ночной работы или всех родителей, имеющих детей до 10 лет, для распределения билетов на новогоднюю елку. Есть банки данных о материалах на складе завода, о книгах в библиотеке и многие, многие другие.

Эти факты могут быть самыми разнообразными, но не любыми. Между ними всегда есть связи. Эти связи и являются закономерностями. Например, возраст и зарплата работника связаны — с увеличением возраста чаще всего растет и зарплата. Механизм этой закономерности очевиден, и не нужно банка данных, чтобы ее вывести. А вот на одном предприятии с помощью банка данных была выявлена такая закономерность: большинство женщин после рождения первого ребенка увольнялись, хотя были ясли. Очевидно, что объяснение такой закономерности и устранение ее причин уменьшают текучесть кадров на этом предприятии. Как видно, выгода от полученной закономерности очевидная.

Именно поэтому так важно умение создавать модели, то есть выявлять закономерности. Банки, в которых хранятся такие модели, называют банками знаний (их пока очень мало).

Итак, упрощенно будем считать, что процесс познания заключается в создании моделей (это тоже «модельное» представление познания, которое выделяет лишь один из его многочисленных аспектов). Будем называть такое познание познанием в узком смысле, в противоположность познанию в широком смысле, включающем исторические, социальные, психологические и другие важные аспекты этого сложнейшего процесса.

Модели бывают разные...

Предыдущий опыт хранит в памяти очень многие и разнообразные наблюдения из нашей беспокойной жизни, и на базе этих наблюдений создаются модели, которые и есть результат процесса познания. Естественно, что эти модели строятся под давлением необходимости (они просто очень нужны для практической деятельности человека) и одновременно при наличии такой возможности у человека, то есть при умении строить модель.

Такое умение совершенно необходимо. Отец русской авиации Н. Жуковский как-то в шутку сказал, что мы решаем не те задачи, которые нужно решать, а те, которые можем решить. Это, конечно, парадокс (и тем и интересен), но здесь есть глубокая мысль-предостережение: не ставить (скажем, пока) неразрешимых задач, даже если они очень важны. Так, например, овладение антигравитацией очень важно для человечества, но на данном уровне развития науки задача об антигравитации даже не ставится, поскольку совершенно неизвестно, как ее решать.

Таким образом, человек, а вместе с ним и все человечество, сначала создавал простейшие модели простейших явлений. Эти модели связывали между собой наблюдаемые ранее факты.

Очевидно, что простые модели опираются на простые наблюдения-факты. А факты бывают разные. Например, наблюдение, что «графиня с перекошенным лицом бежит к пруду», наверняка потребует очень сложной модели, объясняющей столь странное поведение графини (недаром именно этой телеграммой великий комбинатор Остап Бендер пытался вывести из равновесия подпольного миллионера Корейко).

Так вот, такими простейшими фактами являются факты, при которых реализуются причинно-следственные связи. Записываются эти факты в виде такого наблюдения: «При появлении условий A всегда происходит событие B». Например, A — подбрасывание какого-то конкретного камня, B — его падение на землю. A — удар по пальцу, B — боль в пальце, и т. д.

Характерной чертой таких фактов является неизбежность появления следствия B после возникновения причины A. Здесь причина A и следствие B связаны цепью железной необходимости или, как говорят, B детерминировано A. Такая связь A и B называется детерминированной связью. С нее-то и начался синтез моделей и их применение.

Эти модели связывали причину A и следствие B в виде функциональной связи:

$$B = f(A),$$

где буквой f обозначен вид функциональной связи. (Надеюсь вас, читатель, такие знакомые уже вам записи зависимостей не пугают, хотя веселого в этом немного.)

Выявление связи f между причиной A и следствием B и есть создание моделей. Так что f и является моделью изучаемого явления. Причем для необходимых причинно-

следственных связей модель f детерминирована, то есть причина A всегда и везде однозначно вызывает следствие B. Такие детерминированные модели реализуют принцип: «Одинаковые причины вызывают одинаковые последствия».

Стоит ли говорить, что в жизни этот принцип реализуется далеко не всегда, но тем не менее он прост и хорошо отражает специфику детерминированных причинно-следственных связей (а их немало в нашем мире). Именно поэтому он был положен в основу развития науки.

Так наука как система моделей приняла принцип детерминированных моделей. И на это были веские основания, приведенные выше. Но...

Вспомним снова о фактах и наблюдениях. Среди них, кроме указанных выше (из A всегда следует B), есть и другие, которых, увы, большинство. Эти факты могут быть представлены в виде: «При появлении условий A часто (иногда, редко и т. д.) наступает событие B».

Например, «при появлении туч иногда бывает дождь» или «при нарушении правил дорожного движения часто бывают аварии» и т. д.

Здесь причина A не всегда вызывает следствие B. Связь A и B иногда как бы рвется. Такую «рвущуюся» связь причины и следствия естественно назвать индетерминированной. Механизм связи такого рода мы рассмотрели в первой главе (это прежде всего отсутствие нужной информации, которую иногда можно, а иногда и нельзя получить в принципе).

Человек прошлого, стараясь объяснить для себя механизм индетерминированной связи причин и следствий, вводил чужую волю (бога, черта и т. п.), которая и создавала индетерминизм. Действительно, если верить в принцип жесткого детерминизма о том, что одинаковые причины всегда вызывают одинаковые последствия, то неодинаковые последствия можно было списать на козни черта или неблагожелательность бога (при неправедности исследователя, разумеется). Естественно, что наука прошлого не могла примириться с подобной трактовкой, и поэтому такие факты были объявлены вне науки, и она не занималась синтезом моделей, объясняющих эти факты. Действительно, она и не могла этого сделать, опираясь на указанный принцип жесткого детерминизма. А другого наука прошлого пока не знала.

Так огромное количество фактов, не укладывающихся в модель жесткого детерминизма, было отвергнуто наукой и... стало прибежищем суеверий. Религия, естественно, использовала это обстоятельство и благословила использование молитв в помощь страждущим реализовать принцип жесткого детерминизма в случаях, где он не имеет места. Так, например, чтобы выздороветь, кроме врача, следовало обратиться и к богу. А перед сражением, тщательно подготовленным полководцем, необходимо было совершить молебен. Да и нынче (чего уж греха таить!) перед сдачей экзаменов некоторые слабо подготовленные молодые люди выполняют несколько странных ритуалов, которые должны помочь реализовать благополучную сдачу экзаменов. Это все те же молитвы, которые, по утверждению «знающих» людей, детерминируют исход экзамена.

Такое положение в науке, когда одни факты признавались, а другие, по сути дела, отвергались, длилось долго... слишком долго. Это привело к тому, что были разработаны достаточно убедительные доводы в оправдание принципа жесткого детерминизма. Одним из таких доводов, который со временем стал принципом, явилось требование о повторимости эксперимента. Этот методологический принцип стал обязательным правилом любого научного исследования, критерием научности и объективности знания.

Это был апофеоз жесткого детерминизма!

Но факты — вещь упрямая. Сначала очень робко, иногда почти шуточно, а потом вполне серьезно в науке появилось направление, признающее индетерминированные модели. А началось все с азартных игр в кости.

Азарт порождается желанием наживы и случаем, а поэтому не будем винить людей за то, что из этого самого азарта родилась одна из самых блестящих наук современности — теория вероятностей. Дата ее рождения известна абсолютно точно. Это 28 октября 1654 года, когда известный математик Блез Паскаль в письме не менее известному П. Ферма написал слова: «...степень возможности (уверенности) события я назвал вероятностью». И «...в дальнейшем я всюду буду пользоваться термином «вероятность» для обозначения числа, выражающего степень уверенности». И, наконец, самое главное: «...я считаю более простым и естественным принять степень уверенности в появлении достоверного события равной единице. Тем самым степень возможности наступления слу-

чайных событий соизмеряется с тем, какую часть единицы она составляет».

Так впервые нежесткая связь, определяющая появление (или непоявление) какого-то события, была формализована числом, имя которому — вероятность. Именно с этого момента открылась возможность строить модели случайных явлений и первым кирпичом в этом грандиозном здании была вероятность, которую ввел Б. Паскаль.

Статистические модели в отличие от жестко детерминированных позволяют описывать факты, где причинно-следственная связь не детерминирована жестко, а... стохастически. Теперь слова «редко», «иногда», «часто», «очень часто» приобрели числовое содержание. Они были эквивалентны соответственно очень малому значению вероятности (около нуля), просто малому, среднему (около



половины) и бóльшему (около единицы) значению этой вероятности.

Сначала теорию вероятности применяли к азартным играм, чтобы определить справедливость ставки (например, какова должна быть ставка против одного дуката, что при одном бросании двух костей их сумма будет больше шести?). Такое внедрение науки в практику игроков XVII века, безусловно, заслуживало одобрения и прежде всего с моральной точки зрения. Действительно, число умных людей среди игроков должно поубавиться, так как средний исход любой игры теперь можно было вычислить. А стоит ли играть, если исход в среднем предрешен? Единственная надежда, что в данной игре отклонение от среднего будет в вашу пользу. Но это отклонение может быть и в пользу противника! После таких элементарных рассуждений играть в справедливую игру не хочется (а в несправедливую к себе — тем более).

Едва ли, однако, теория вероятностей способствовала поднятию нравов в XVII столетии, как, впрочем, она не способствует этому и теперь. Но азартные игры предоставили в распоряжение ученых великолепный ассортимент простых индетерминированных фактов, которые поэтому удалось осмыслить и построить первую вероятностную (стохастическую) модель. Азартные игры и поныне считаются хорошей школой и дают богатую пищу для размышлений при решении задач в учебниках по теории вероятностей.

Отметим, что применение теории вероятностей к азартным играм было вполне корректным (или, как говорят, аппарат теории вероятностей адекватен такому объекту, как азартные игры). Это связано с тем, что в этих играх в явном виде присутствует случайный механизм — бросание костей, тасование карт, движение шариков в лототроне и т. д. Теория вероятностей и была ориентирована на исследование свойств процессов с такими случайными механизмами.

Но этим не ограничилось.

Многие сложные явления, как оказалось, ведут себя очень похоже на случайные явления. Так, например, поток клиентов в парикмахерскую считается случайным. А случаен ли он? Если вы спросите любого клиента парикмахерской, а не случайно ли зашел он, то наверняка его обидите. Действительно, посещение парикмахерской скорее всего планировалось им заранее и не было для него случайным актом. Тем не менее для работников па-

рикмахерской его приход мог быть неожиданным, случайным, если они ничего не знали о планах клиента. Здесь налицо случайность, вызванная отсутствием информации (механизм ее образования был описан в первой главе).

Можно ли было избежать этой случайности?

Конечно, можно! Для этого работникам парикмахерской было бы достаточно позвонить потенциальным клиентам и выяснить, когда они собираются прийти в парикмахерскую. Тогда поток клиентов в парикмахерскую был бы вполне детерминированным, что, естественно, дало бы возможность эффективно планировать ее работу и повысить показатели работы. Это и есть доход, обусловленный получением необходимой информации от клиента, то есть доход перехода от статистической модели процесса прихода клиентов к детерминированной. А расходы?

Увы, они, как легко догадаться, будут очень большими. Наверняка придется удвоить, а то и утроить штат работников парикмахерской, чтобы создать информационную службу для сбора информации о намерениях клиента.

Вот и получается, что хотя стохастическая модель потока клиентов не дает хорошо спланировать работу парикмахерской, но приходится использовать именно ее, поскольку детерминированная (регулярная) модель потока клиентов сто́ит слишком дорого и преимущество, которое она дает, никак не покрывает затраты на ее получение.

Короче, выгоднее считать поток случайным, чем регулярным. И причиной этому — простота и практичность стохастической модели по сравнению с детерминированной. Именно поэтому очень часто обращаются к простым стохастическим моделям (при этом неизбежно что-то теряя), чтобы избежать «проклятия» сложности детерминированных моделей. Это «проклятие» преследует всех, кто пытается описывать поведение сложной системы с помощью детерминированной модели.

Однако это не означает, что всегда в сложных задачах следует обращаться к стохастическому описанию поведения объекта. Делать это надо только там, где можно мириться с приближенностью стохастической модели. Там же, где требуются точные соотношения между причиной и следствием, следует создавать только детерминированные модели, пусть даже очень дорогие.

Так, например, если от точности модели зависит опре-

деление момента появления какого-то рокового фактора (вызывающего, например, большую аварию), то ни о каких стохастических моделях речи быть не может!

Но такие «строгие» ситуации встречаются не так часто, и поэтому стохастические модели поведения сложных систем используются очень широко в науке, производстве и народнохозяйственной практике.

Случайность как сложность

Очень часто при управлении сложными объектами, например, типа технологических процессов, используют довольно забавный, но вполне корректный прием описания сложного объекта, то есть создания его модели. Здесь используют не все, а лишь некоторые основные факторы, воздействующие на объект. А другие факторы, также влияющие на поведение объекта, но почему-либо неудобные, называют второстепенными и полностью закрывают на них глаза. Причина «неудобности» этих факторов может быть различной — либо их трудно контролировать (измерять), либо они очень сложно влияют на поведение объекта, и поэтому их трудно учитывать в модели — она станет очень сложной и т. д.

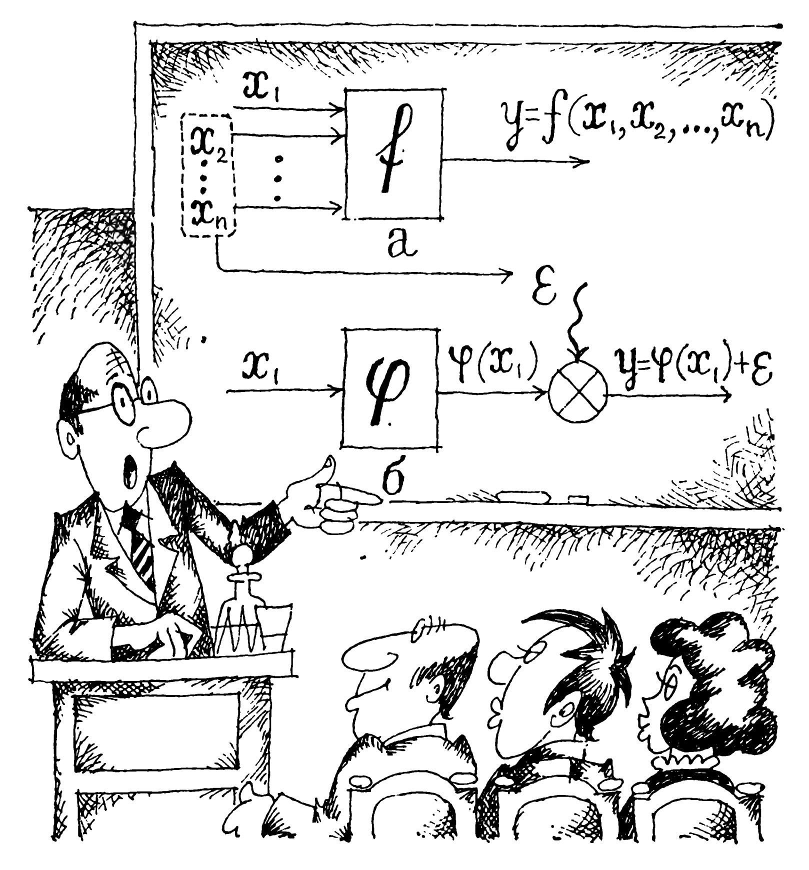
Такой на первый взгляд «незаконный» прием опирается на следующие очевидные соображения. Всего ведь все равно «объять» нельзя, а поэтому и не надо пытаться учитывать максимальное число факторов (как требует «строгая» наука). Достаточно учесть основные, а неучтенные факторы будут вносить в модель неизбежную погрешность, которую (вот здесь и скрыта основная мысль) мы будем считать случайной. Это значит, что отличие в поведении объекта и такой упрощенной модели предполагается случайным. Оно и понятно, так как на объект действует еще уйма неучтенных факторов, что и вызывает отклонение его поведения от поведения модели. И это отклонение мы считаем случайным, то есть отождествляем со случайной помехой.

Удобство такого предположения очевидно — со случайной помехой легко бороться — достаточно осреднить несколько измерений, чтобы значительно понизить влияние такой случайности.

Таким образом, не учитывая какие-то факторы, мы вправе считать их случайными, хотя они таковыми могут и не быть. Но предположение об их случайности дает нам в руки мощный инструмент борьбы с этой случайностью.

Этот прием показан на рисунке, где на а показано само изучаемое явление f с n причинами $x_1, x_2, \ldots x_n$ и одним следствием y (здесь явление f представлено в виде преобразователя n причин в одно следствие или, как часто называют в технике, в виде $n+1$ — полюсника, то есть преобразователи n входов $x_1, x_2, \ldots x_n$ в один выход y). Очевидно, что преобразование f определить тем трудней, чем

Здесь (а) представлено какое-то явление f как преобразователь нескольких n причин в одно следствие y. Для составления модели такого явления нужно затратить усилия, пропорциональные числу n. А нужно ли так напрягаться? Очень часто достаточно построить модель φ (см. *б*) влияния одной основной причины x_1, а влияние остальных причин $x_2, x_3, \ldots x_n$ исключить и свести к помехе ε, которую удобно считать случайной. Это тем более верно, чем сложнее поведение исключаемых причин.



больше число n (число причин-входов). Например, в задаче прогноза погоды температура на завтра (y) зависит не только от температуры сегодня x_1, но и от влажности x_2, скорости x_3 и направления x_4 ветра, температуры области, откуда дует ветер (x_5), и т. д. и т. п.

В такой сложной ситуации естественно желание выявить зависимость от одной главной причины x_1 (или нескольких главных), а остальные $x_2,\ldots x_n$ считать случайными помехами. Это показано на рисунке на стр. 54, где помеха ε случайно искажает следствие φ. Здесь зависимость $\varphi(x_1)$ уже значительно проще, чем f, она описывает влияние лишь одной причины x_1 и поэтому определяется со значительно меньшей затратой усилий (примерно в n раз меньше, чем при учете всех n причин).

Итак, мы в результате получаем «случайно зашумленное» следствие y — это «плата» за простоту модели φ по сравнению со сложным явлением f. Но здесь нам известно, как и чем «платить» — надо осреднять помеху ε, опираясь на то, что она случайна. Но случайна ли она? Вот здесь и происходит самое главное: мы считаем ее случайной, если исключаемые причины $x_2, \ldots x_n$ изменяются каким-то сложным образом (возможно, и не случайным).

Применяя такой прием к задаче о прогнозе погоды, получаем для средних широт:

$$y = x_1 + \varepsilon,$$

то есть температура завтра будет такой же, как сегодня, с некоторой случайной ошибкой ε, которая (в силу своей случайности) может быть и положительной и отрицательной равновероятно. Не верите? Можете проверить, если у вас есть термометр и желание записывать его показание в одно и то же время. Знак случайной величины ε ведет себя почти так же, как монетка в опыте с ее подбрасыванием, то есть случайно.

Такой прием (считать сложное случайным) является очень распространенным не только в обыденной жизни, но и в науке и технике. И на это есть серьезные основания. Дело здесь вовсе не в лености исследователей, не желающих строить модели сложных явлений, хотя вопрос об экономии средств и усилий на создание моделей всегда и везде стоит достаточно остро. Причины эффективности подмены сложности случайностью таятся глубже. Дело в том, что сложность и случайность не только «похожи», но и близки по своим проявлениям. Об этом поговорим чуть позже.

Случай против... алкоголя

Да, да! В истории борьбы с алкоголем случай сыграл свою роль в виде рандомизации экспериментов по выявлению опасных концентраций алкоголя в крови шоферов. И вообще, желая построить эксперимент для выявления той или иной сложной закономерности, приходится обращаться к рандомизации.

Примером такой важной и сложной закономерпости является влияние алкоголя на скорость реакции человека в той или иной ситуации.

О том, что скорость реакции на внезапно возникающие опасные ситуации должна быть высокой, знают все, особенно те, кто сам водит автомашину или сидит рядом с шофером. Знают также все, что алкоголь снижает эту скорость. Но не все... придают этому значение (попросту пренебрегают своими знаниями). Последствия такого рода пренебрежения известны и трагичны. Общество не может позволить себе терять своих даже легкомысленных членов и... вводит алкогольный контроль на дорогах.

Контроль должен осуществляться прибором. Но всякий прибор имеет свой порог чувствительности. Имеет такой порог и прибор для определения содержания алкоголя в крови. Если он не показал содержания алкоголя, то это вовсе не значит, что алкоголя нет. Просто его количество ниже того порога, который в состоянии определить данный прибор.

Естественное соображение — сделать этот порог очень малым, чтобы выявлять ничтожные следы алкоголя, не выдерживает критики.

Во-первых, такой сверхчувствительный прибор будет очень дорог, а во-вторых, он будет безжалостно «обвинять» шоферов, которые пили вчера или даже позавчера (известно, что алкоголь выводится из организма достаточно медленно — в течение недели — и чем его меньше, тем медленней он выводится).

Вот и получается, что порог чувствительности такого детектора алкоголя должен быть оптимальным, то есть не слишком малым, чтобы не снимать с трассы шоферов, выпивших вчера бутылку пива, и не большим, чтобы не пропускать любителей выпить (пусть не за рулем, но и около машины).

Определение оптимального порога должно опираться прежде всего на знание о том, как алкоголь влияет на

скорость реакции. Это и есть интересующая нас закономерность.

$$T = f(x),$$

где x — процентное содержание алкоголя в крови, T — время реакции, f — искомая закономерность.

Если читателю предложить построить эту закономерность (хотя бы в виде графика), то он наверняка бы с легкостью взялся за это дело. Действительно, что может быть проще? Давать испытуемым разные дозы алкоголя и каждый раз определять время реакции.

Для этого прежде всего надо построить несложный прибор для определения времени реакции. Он состоит из нескольких (например, двух) лампочек и такого же числа кнопок, расположенных под этими лампочками. Испытуемый должен быстро нажать ту кнопку, над которой загорается лампочка. При этом она потухнет. Так определяется время реакции испытуемого, поскольку время горения лампочки фиксируется секундомером. Так как лампочки включаются случайно, то угадать, какая загорится следующей, нельзя в принципе. Эта случайность и обеспечивает чистоту эксперимента по определению времени реакции испытуемого.

Точки, полученные читателем в таком эксперименте, будут располагаться скорее всего так, как показано на рисунке на стр. 58. Остается провести гладкую кривую, проходящую через эти точки, и искомая зависимость f готова! (Говоря строго, это не совсем та зависимость, так как доза алкоголя и процентное содержание его в крови не одно и то же. Но они очень похожи.)

Но не слишком ли лихо мы расправились с поставленной задачей? Давайте подумаем! Здесь есть над чем поразмышлять.

Дело в том, что полученная таким способом зависимость будет справедлива только для вас, да и то в тех условиях, когда вы ставили столь драматические эксперименты с собой. Но ведь ГАИ интересует реакция не ваша, а некоего среднего водителя, реакция которого наверняка отличается при различных дозах алкоголя от вашей.

Как же найти такого типичного представителя бесчисленной армии водителей?

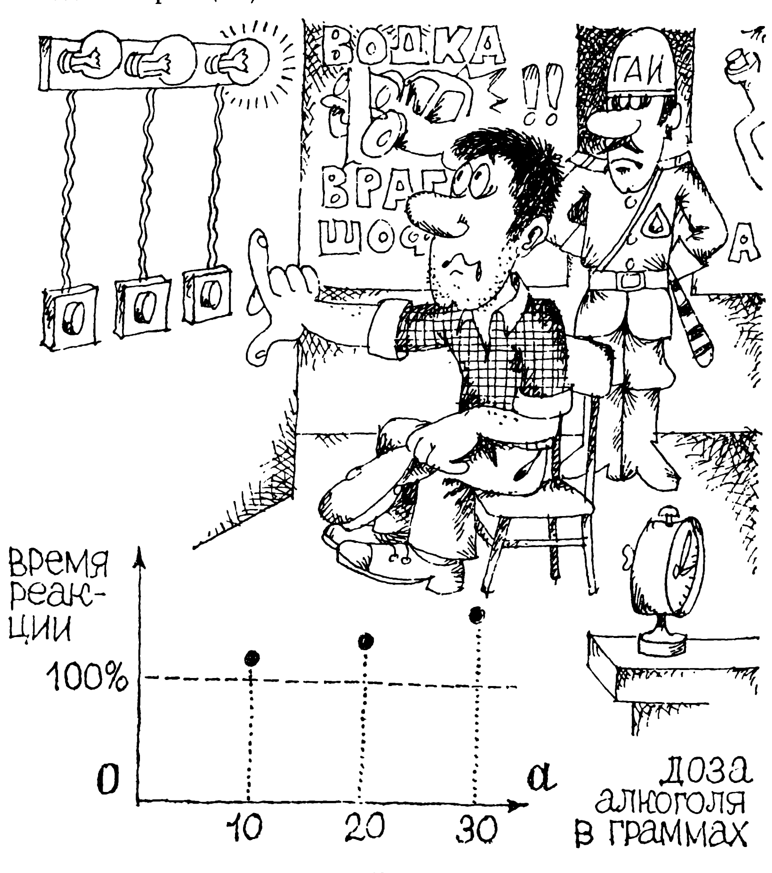
Когда говорят о среднем (типичном), приходит здравая мысль об осреднении. Давайте построим зависимость для нескольких человек и осредним результат. Лучше всего, если эти «несколько» были бы все водителями, но это невозможно, так как их слишком много. Поэтому со

всей неизбежностью встает сложнейший вопрос о том, какие же эти «несколько», с которыми надо делать эксперименты? Если вы пригласите для этого членов семьи, то едва ли приблизитесь значительно к решению поставленной задачи. Для ответа на этот не очень простой вопрос нужно разобраться в том явлении, модель которого мы строим — ведь f — это только модель.

Действительно, так ли проста искомая зависимость? И не влияет ли на время реакции Т еще что-нибудь?

Оказывается влияет, и очень здорово! Зависимость $y=f(x)$, написанная ранее, не учитывает множество важ-

Вот так выглядят результаты эксперимента по выявлению зависимости между временем реакции и дозой принятого алкоголя для одного испытуемого. (Пунктиром обозначен уровень T_0 — безалкогольной реакции.)



нейших факторов, которыми нельзя пренебрегать при решении такого важного вопроса.

Зависимость f должна быть записана иначе:

$$y=f(x_1,x_2,...x_n),$$

где к известному фактору x_1 — количеству алкоголя — добавляется еще x_2 — возраст испытуемого, x_3 — его пол, x_4 — состояние испытуемого перед приемом алкоголя (например, был ли он сытым или голодным), x_5 — до или после работы происходил эксперимент, x_6 — когда (утром, днем или вечером) пришел испытуемый, и т. д. Читатель наверняка сможет сам привести еще столько же факторов, влияющих на скорость реакции.

Вот и получается, что факторов много, а исследовать надо только влияние одного — алкоголя. Как же быть? Их влияние надо исключить! Или, как говорят, элиминировать.

Простейшим приемом такого исключения является соблюдение «прочих равных условий». В этом случае все факторы фиксированы, и поэтому они не вносят разброса в результаты эксперимента. Но полученная при этом зависимость будет хорошо отражать суть дела только для этих фиксированных условий. А при других?

Нет, нужно другое!

Как всегда, когда имеется помеха (а мешающие факторы являются помехой), нужно вводить осреднение по этой помехе, то есть все мешающие факторы (x_2, ...x_n) должны в эксперименте изменяться так, как они изменяются в жизни от одного водителя к другому. А что значит «в жизни»? Жизнь — штука сложная. Поэтому давайте дадим ей проявиться самой.

Для этого вывесим объявление: «Приглашаются водители для экспериментов по определению влияния доз алкоголя». Читатель без труда догадался, кто станет в очередь к экспериментальному стенду. Полученная в этих экспериментах зависимость будет иметь ярко выраженную алкогольную направленность. Так что некорректность такого решения очевидна.

В чем же причина? Ведь мы пытались сделать все «как в жизни».

Причина неудачи в том, что мы пустили дело на самотек (мол, приходите кто хочет), а нужно было указать, кто именно должен приходить на эксперимент. Вот тут и нужна рандомизация.

Делается это так. Мешающие факторы, такие, как возраст, пол, состояние и др., должны быть определены слу-

чайно. Например, возраст (фактор x_2) может изменяться от 18 до 60 лет; поэтому первое случайное число в этих пределах даст возраст испытуемого № 1; второе — № 2 и т. д. Пол испытуемого (фактор x_3) определится тоже случайно: Ж или М. Очевидно, что среди испытуемых должно быть больше мужчин во столько раз, во сколько их больше среди шоферов. Пусть мужчин-шоферов больше в два раза. Тогда вероятность вызова женщины на эксперимент будет равна $^1/_3$, а мужчины — $^2/_3$. Аналогично поступают и с другими мешающими факторами. Они также выбираются случайно, причем свойства этой случайности должны отражать состояние этих факторов у всей армии водителей.

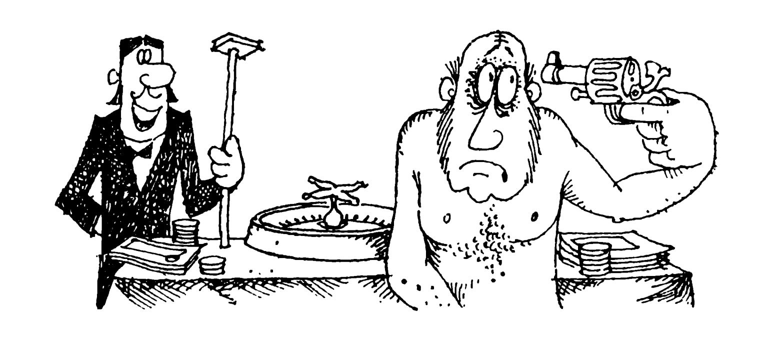
Теперь можно быть уверенным, что испытуемые, вызванные с помощью рандомизации, будут правильно представлять всех водителей. Следовательно, и зависимость f, полученную путем осреднения всех экспериментов, можно считать представительной.

Случайность здесь выступает как средство образования небольшой, но представительной выборки испытуемых из общего огромного множества всех шоферов. Причем свойства этой небольшой выборки совпадают со свойствами интересующего нас множества шоферов. В этом и состоит замечательное свойство рандомизации.

Она позволяет строить правильные модели по малому числу экспериментов, зависящих от многих факторов. Для этого достаточно мешающие факторы сделать случайными. Эта случайность гарантирует правильность полученной таким образом модели.

Рандомизация при всей своей внешней необычности (все мешающие факторы считаем случайными!) не является чем-то уж очень экзотичным. Мы в повседневной жизни широко пользуемся ею.

Действительно, отбрасывая малосущественные факторы и зная, что это приведет к приближенности наших представлений (то есть моделей), которыми собираемся пользоваться, мы применяем прием рандомизации. При этом мы молчаливо предполагаем неучитываемые факторы случайными, чем и обеспечиваем рандомизацию. (Это не исключает ошибок, если отбрасываемые факторы нельзя было считать случайными, но в этом случае они существенны и ими нельзя пренебрегать.)



глава третья.

МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО НЕ РОСКОШЬ, А СРЕДСТВО ВЫЧИСЛЕНИЯ!

Нас всех подстерегает случай.

А. Блок

В науке этот метод еще называют методом статистических испытаний. Но это скучно! Куда интересней звучное название «Монте-Карло»! Любопытно, что такие броские названия очень часто сохраняются в науке, хотя это зачастую мешает развитию той области, где появилось очередное броское имя. И вред этот связан прежде всего с неверными ассоциациями, которые вызывает новое название у неспециалистов. С их мнением можно было бы не считаться, если среди неспециалистов не встречались бы люди, чье решение влияет на развитие науки (например, по линии финансирования). И здесь, оказывается, есть над чем призадуматься.

Так или иначе, но метод Монте-Карло выдержал испытание временем. Более того, родившись без малого сорок лет назад, он продолжает завоевывать новые области применения и расширять завоеванные.

В чем его суть? Если очень коротко и, следовательно, неточно, то он заключается в использовании случайности для расчетов. А при чем здесь Монте-Карло?

Да ни при чем! При очень большом желании можно монте-карловскую рулетку рассматривать как датчик случайных чисел от 0 до 99. Но никому в голову не взбредет сделать это на практике. Реальные датчики случайных чисел работают значительно проще и во много раз быстрее.

Но уж если к монте-карловской рулетке был проявлен такой интерес, расскажем об устройстве и правилах игры в рулетку (любую, так как все рулетки, по сути, одинаковы).

Что такое игра в рулетку!

Она представляет собой большую тарелку, на дне которой по кругу расположены 100 лунок, пронумерованных от 0 до 99. Шарик вбрасывается по касательной к краю этой тарелки и делает по ней десяток-полтора оборотов, пока не попадает в одну из лунок, номер которой и определяет выигрыш. Ставки можно делать двояким образом: на цвет (половина номеров имеют красный цвет, а другая половина — зеленый) и на цифру. Если ваш цвет выиграл, то вы получаете вдвое больше, чем поставили. Если ставка была на цифру и эта цифра выиграла, то счастливец получает в 100 раз больше, чем поставил. Но вероятность этого радостного события, как легко заметить, равна $^1/_{100}$, то есть в среднем из ста таких ставок выигрывает лишь одна. На лунку с номером ноль («зеро») всегда ставит казино, так что при попадании шарика в эту лунку все ставки забирает казино.

На первый взгляд эти правила справедливы, и игра в рулетку безобидная, то есть шансы у всех игроков, включая казино, одинаковы. Но только на первый! Точный математический анализ (его сделал в прошлом веке один из математиков) показывает, что это игра обидная. В среднем выигрывает всегда казино. Это происходит за счет того, что расчет с выигравшими происходит за счет проигравших, а при зеро все забирает казино. Так что, если вы хотите выиграть, не играйте в рулетку: то, что вы собирались поставить, и есть ваш выигрыш (в среднем, разумеется).

Статистические свойства рулетки очевидны: вероятность цвета — $^1/_2$, цифры — $^1/_{100}$ и независимость результатов. Незнание последнего свойства лежит в основе всех «систем» игры в рулетку. Например, ждать, пока подряд несколько раз шарик упадет на красное, и поставить на зеленое. Наивность подобной «стратегии» показана в первой главе.

Но хватит об игре в рулетку. Кроме обычного азарта, она ничем не привлекательна. Вернемся к методу Монте-Карло.

Случай на службе вычислений

Нужно ли говорить о том, что потребность человечества в вычислениях стремительно растет год от года. Именно эта потребность привела к изобретению ЭВМ, которые взвалили на свои «железные плечи» все тяготы решения сложных вычислительных задач.

Для того чтобы решить задачу, в ЭВМ нужно ввести информацию двоякого рода. Во-первых, это исходные данные, характеризующие решаемую задачу. А во-вторых — правило решения задачи, которое называют алгоритмом. Очевидно, что прежде, чем решать задачу на ЭВМ, надо получить алгоритм ее решения, то есть либо найти его в справочнике, либо попросить у специалиста в этой области, либо... разработать самому. Так или иначе, но алгоритм решения задачи должен быть.

Таких алгоритмов за всю историю вычислений накопилось достаточно много, и все они были разработаны для, как говорят, «ручного» использования. Другого и не могло быть, так как все вычисления раньше производил только человек. Даже производство арифмометров в конце прошлого века не изменило ситуации — ведь арифмометр позволял механически производить лишь простейшие арифметические операции типа сложения, умножения и др.

Очевидно, что с появлением ЭВМ и ей стали поручать вычисления по имеющимся алгоритмам. Образовалось явное противоречие между почти неограниченными возможностями ЭВМ и «ручными» алгоритмами, по которым она работала. Нужны были специальные «машинные» алгоритмы, ориентированные для расчетов на ЭВМ. И такие алгоритмы появились.

В 1949 году (через три года после появления первой ЭВМ) был предложен метод, названный его авторами «методом Монте-Карло». Поясним его суть на одной важной практической задаче — вычислении площади сложной фигуры, например, такой, как показано на рисунке на стр. 64.

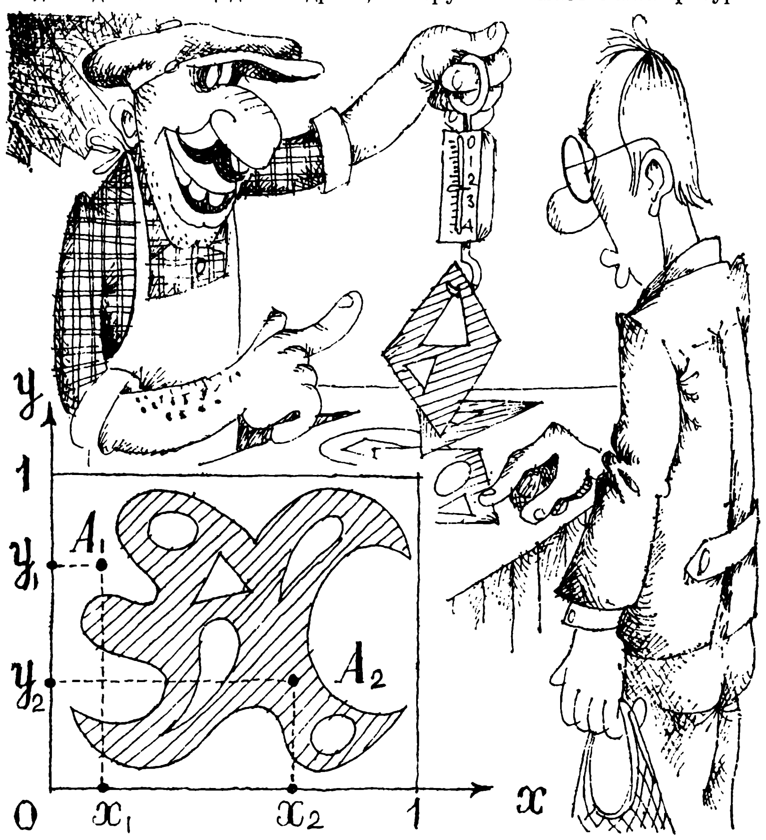
Одним из «ручных» методов определения площади фигуры является ее взвешивание. Для этого вырежем из бумаги квадрат, на котором нанесена фигура, и взвесим его. Пусть он весит P_1 граммов. Далее вырежем фигуру по контуру и взвесим ее. Получим P_2 — граммов. Теперь, как легко заметить, интересующая нас площадь фигуры

составляет $\frac{P_2}{P_1}$-ую часть площади квадрата. Пусть его площадь равна S_1. Тогда искомая площадь фигуры равна

$$S = S_1 \frac{P_2}{P_1}.$$

Всем хорош этот метод, но... неточен (велики ошибки при вырезании фигуры, да и неравномерность плотности

Как вычислить площадь такой «кривой» фигуры? Кто занимался подобного рода вычислениями, знает, насколько это нудная задача, которая так и просится на ЭВМ. Метод Монте-Карло позволяет очень просто автоматизировать процесс высчислений. Для этого достаточно вырабатывать по два случайных числа x и y и контролировать попадание точки (x, y) на фигуру. Отношение числа попаданий на эту фигуру к общему числу точек N и дает долю площади квадрата, которую занимает наша фигура.



бумаги порождает ошибки) и требует кропотливой ручной работы: вычерчивание фигуры, вырезание ее, взвешивание.

А теперь для решения этой же задачи применим метод Монте-Карло. Будем на квадрат, в котором расположена наши фигура, «набрасывать» случайные точки A_1, A_2... . Каждая точка характеризуется своими координатами x и y, то есть $A_1=(x_1,y_1)$, $A_2=(x_2,y_2)$,... .

Если случайные числа x и y будут равномерными в интервале от 0 до 1, то и точки A_1, A_2, ...равномерно покроют поверхность квадрата. Пусть N_1 — общее число таких точек, а N_2 — число точек, попавших на нашу фигуру. Очевидно, что N_1 будет пропорционально площади квадрата, а N_2 — площади фигуры, поскольку случайные точки рассеяны равномерно. Поэтому площадь фигуры можно оценить по формуле:

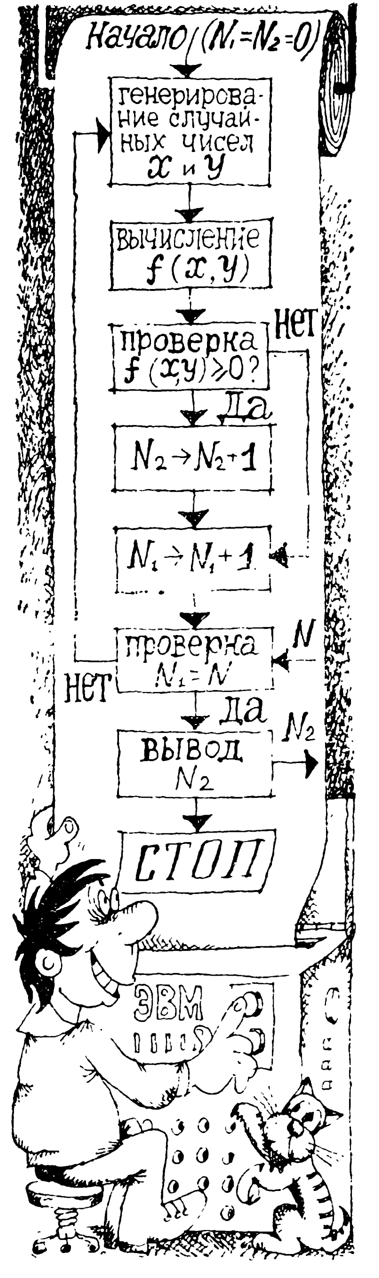
$$S = S_1 \frac{N_2}{N_1},$$

где S_1 — по-прежнему площадь квадрата. Это выражение приближенное, так как число N_2 — случайное. Но чем больше точек будет «брошено», тем точнее эта формула оценивает площадь фигуры. При этом точность такой монте-карловской оценки, то есть величина ошибки, пропорциональна $\frac{1}{\sqrt{N_1}}$.

Как с такой задачей справляется ЭВМ?

Очень просто. Ведь для ЭВМ самой «любимой» задачей является та, решение которой сводится к многократному повторению простых операций (именно это не любит делать человек). Какие операции ей приходится выполнять в этом случае?

Во первых, это генерирование равномерных случайных чисел в интервале от 0 до 1. (Как это делается, мы рассмотрели в первой главе. А во вторых — проверка попадания точки $A=(x,y)$ на фигуру. Это сугубо вычислительная операция. Для этого надо вычислить значение функции двух аргументов $f(x,y)$, специально сконструированной для нашей фигуры. Эту функцию называют индикаторной. Она принимает положительные и отрицательные значения. Договоримся, если $f(x,y) \geqslant 0$, то это означает, что точка $A=(x,y)$ попала на фигуру, а при $f(x,y)<0$ — вне ее. Построение такой индикаторной функции несложно, и она целиком определяется формой интересующей нас фигуры (ниже мы приведем пример конкретного построения такой фигуры).



Программа работы ЭВМ, решающей нашу задачу, должна содержать следующее:

1. Генерирование двух случайных чисел x и y.

2. Вычисление функции $f(x, y)$.

3. Проверка выполнения $f(x,y) \geqslant 0$ (то есть выясняется, попала ли случайная точка на фигуру).

4. Увеличение N_2 на единицу при $f(x,y) \geqslant 0$ (это подсчет числа попаданий случайных точек на фигуру).

5. Увеличение N_1 на единицу (это подсчет общего числа случайных точек).

6. Проверка выполнения условия $N_1 \geqslant N$, где N — заданное число точек (это проверка на окончание расчета; если его не ввести, то ЭВМ никогда не остановится).

7. Вывод результата N_2 и стоп, если $N_1 = N$.

8. Перейти к пункту 1 при $N_1 < N$, то есть снова начать расчет, если общее число точек не достигло заданного N.

Теперь легко составить блок-схему программы для ЭВМ — она показана на рисунке на стр. 66.

Это схема программы для ЭВМ, вычисляющей площадь фигуры методом Монте-Карло. Здесь самая трудоемкая по времени операция заключается в определении попадания случайной точки на фигуру. Многократное повторение такой программы и образует преимущество методов Монте-Карло.

Вначале нужно занулить счетчики чисел N_1 и N_2 и задать число N — общее количество расчетов. Перед окончанием работы ЭВМ она выдает последнее значение N_2, разделив которое на N легко получить площадь фигуры. Задача ЭВМ сводится, по сути дела, к N-кратному вычислению $f(x, y)$, то есть определению: попала случайная точка (x,y) на фигуру или нет. Это самая трудоемкая операция; остальные же — прибавление единицы и проверки условий — занимают ничтожное время.

Это и есть идеальный режим работы ЭВМ — короткая программа, многократно повторяемая для получения результата. Метод Монте-Карло обеспечивает именно такой режим работы ЭВМ. Поэтому он и является методом, адекватным современным вычислительным машинам. Именно этим объясняется неуклонный рост общего объема расчетов методом Монте-Карло (в некоторых вычислительных центрах этот объем составляет до 90 процентов всего машинного времени).

Вычислим число «пи»!

Всем известно число π («пи»). Оно равно отношению длины окружности L к ее диаметру D (или двум радиусам — $2R$):

$$\pi = \frac{L}{D} = \frac{L}{2R}.$$

Определять это число путем измерения длины окружности явно неудобно и неточно. А вот умея измерять площадь круга (для этого и понадобится нам метод Монте-Карло), можно легко определить число π. Для этого достаточно вспомнить, что площадь круга S равна πR^2.

Будем определять площадь четверти круга (это удобнее) единичного радиуса $(R=1)$. Обозначим ее S^1. Тогда легко определить «пи»:

$$\pi = LS^1.$$

Итак, все свелось к определению этой четвертушки. Применим для этого метод Монте-Карло, описанный выше.

«Бросая» на квадрат случайные точки A_1, A_2, ..., то есть генерируя пары случайных чисел x и y и подсчитывая число точек, попавших внутрь круга, можно оценить площадь как отношение

$$S^1 = \frac{N_2}{N_1},$$

где N_2 — количество случайных точек, оказавшихся на

круге (точнее, на его четвертушке), а N_1 — общее число случайных точек. Вот и все!

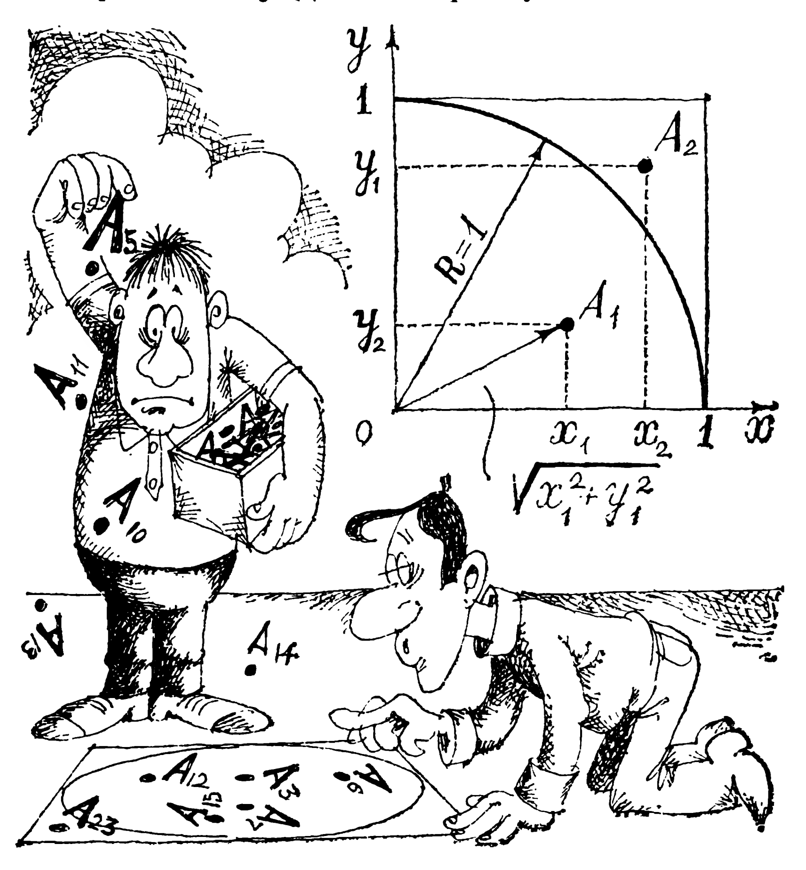
Чтобы воспользоваться программой, представленной на рисунке на стр. 66, нужно определить индикаторную функцию $f(x, y)$. Легко видеть, что она имеет вид:

$$f(x,y)=1-\sqrt{x^2+y^2},$$

то есть для точек внутри круга (и только для них) она принимает положительные значения. (Заметим, что индикаторную функцию можно упростить: $f(x,y)=1-x^2-y^2$, так как окружность имеет единичный радиус.)

Определим, как велико должно быть число расче-

Для определения площади круга методом Монте-Карло достаточно взять его четверть и проверять попадание случайных точек внутрь этой четвертушки круга, то есть проверять выполнение неравенства $x^2+y^2\leqslant 1$, что легко реализуется на ЭВМ.



тов N, чтобы получить приемлемую точность оценки числа π. Ошибку метода (в соответствии с теорией) здесь можно считать равной $\frac{1}{\sqrt{N}}$ · Таким образом, для получения $\pi = 3{,}14$ можно ошибиться не более чем на 0,002 (еще предстоит умножать результат на 4). Приравнивая $\frac{1}{\sqrt{N}} = 0{,}002$, получаем $N = 250\,000$, то есть четверть миллиона вычислений. Хорошая ЭВМ справляется с этой задачей за несколько секунд.

Для получения $\pi = 3{,}1$ нужно значительно меньше $N = 2500$. И вообще, для повышения точности в 2 раза число вычислений N в методе Монте-Карло следует, по сути дела, увеличить в 4 раза. Это ограничивает применение метода для особо точных расчетов. (Именно поэтому многозначное число π вычислялось по-другому, приведенный же здесь подход лишь иллюстрирует применение метода Монте-Карло.)

А теперь рассмотрим применение метода Монте-Карло для решения важных практических задач. Именно благодаря им этот метод и стал знаменитым.

Сон главного инженера

Нашего героя — главного инженера завода — одолевали очень большие заботы. К малым он привык и не обращал на них особого внимания, справедливо считая, что их должны взять на свои плечи его помощники и подчиненные — замы, помы и т. д. Но большие приходилось решать самому. А вот с очень большими было трудно — перепоручать их было некому, и самому решить не удавалось, слишком уж сложными они были.

А надо было определить: справится или не справится завод с заданием, которое ему предложили в министерстве? Отказаться просто, но вместе с этим будут упущены большие возможности по расширению завода, жилищного строительства, да и премии не излишни, не говоря уж о возможных правительственных наградах — заместитель министра довольно прозрачно намекнул о них. А взяться и не выполнить — еще хуже! Прошла пора, когда можно было оправдаться ссылкой на «объективные причины». Нынче надо выполнять обязательства в любом случае.

Итак, брать или не брать — вот в чем вопрос! Вопрос этот позаковыристей гамлетовского. Здесь решается судь-

ба не одного человека, а целого завода. Хорошо Гамлету — в случае ошибки из трагедии получился бы только фарс (если бы его отца убил не его дядя, а кто-то другой). А тут от твоей ошибки весь завод будет лишен многих благ (да и ты сам в первую голову).

Главный инженер пожалел, что он живет не в древние века, когда вопрос выбора решался просто — нужно только спросить у оракула, предварительно сделав ему соответствующее подношение. Сидел инженер при этом в удобном кресле и... задремал. Когда же открыл глаза, перед ним сидел... черт. Нет, не лохматый с хвостом и копытами, а в хорошем костюме, очках в оправе «сенатор» и с «дипломатом» на коленях. Но по его глазам главный инженер понял, что имеет дело с самым настоящим чертом. Тот равнодушно оглядел комнату, поморщился и, глядя в сторону, спросил ледяным голосом:

— Зачем вызывали? Опять план выполнять нужно? Или что достать? Выкладывайте!

Главный инженер взорвался.

— Вы по какому, собственно, праву... — и осекся, так как понял, что это только сон, и, по-видимому, занятный. В чертей он не верил, а завидное психическое здоровье гарантировало его от производственного бреда. Итак, только сон. Ну и что ж! И во сне приходят иногда здравые мысли — подумал главный инженер и вспомнил известную легенду о том, что Д. Менделеев открыл свою периодическую таблицу во сне. Почему бы и ему не воспользоваться этим сном, чтобы принять решение?

— Видите ли, дорогой мой, — начал главный инженер, но черт резко его оборвал.

— Прошу без фамильярностей! Наш договор не дает вам права...

— Какой договор? — изумился главный инженер, и это заставило изумиться черта. Их дальнейшую беседу удобнее передать в стенографической форме, где буквами ОЧ обозначены реплики обыкновенного черта (это рядовой черт), а ГИ — главного инженера.

ОЧ. Как какой? А не вы ли подписали эту бумагу? (Вынимает из «дипломата» договор и показывает его ГИ. Хорошо видна подпись, сделанная красным венгерским фломастером).

ГИ. Ну-ка, покажите! (Смотрит с интересом и узнает подпись главного инженера смежного завода, который в последнее время вдруг стал выполнять план и из безна-

дежно отстающих почти вышел в передовые.) Очень жаль (вздыхает), но это не моя подпись!

ОЧ (засуетился). Как это не ваша? Ведь вы главный инженер Промстальремсбыттырпыр?

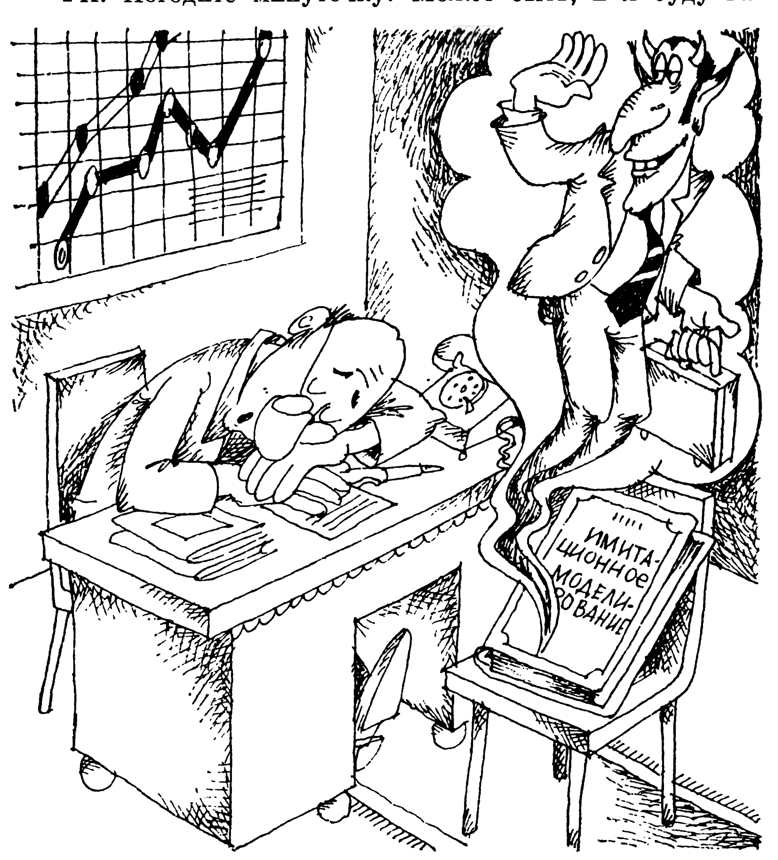
ГИ. Нет, дорогой мой, я главный инженер Стальпромсбытремпыртыр!

ОЧ (с изумлением). А разве это не одно и то же? Ведь от перемены мест...

ГИ. ...еще как меняется! Ну, если уж вы явились, то помогите мне хоть советом.

ОЧ (сухо). Советы даем только по договору. А у нас с вами произошел ложный вызов (начал чертыхаться вполголоса и медленно исчезать).

ГИ. Погодите минуточку! Может быть, и я буду ва-



шим клиентом (черт с ним, во сне можно и покривить душой). Но только покажите, что вы умеете!

ОЧ (снова возникнув). Мы умеем все, что не противоречит законам природы. Один совет сугубо в рекламных целях — можно. Спрашивайте!

ГИ (излагает свои трудности по принятию решения). Так брать или не брать заводу этот заказ?

ОЧ (поморщившись). У вас какие-то средневековые представления о нечистой силе! Только вы сами можете принять такое решение, как и всякое другое. Мы же, со своей стороны, лишь можем оценить возможные последствия того или иного решения. Но сам выбор предстоит сделать вам.

ГИ. Хорошо. Тогда скажите, какие последствия будут при решении «брать заказ» и при решении — «не брать»?

ОЧ (раздраженно). Вы что, издеваетесь? Каким это образом, не располагая необходимыми сведениями, мы сможем оценить интересующие вас последствия? Вам нужно обратиться к ясновидцам, а не в солидную фирму. Только эти шарлатаны (я имею в виду прорицателей) принимают заказы на прогнозы при нулевой исходной информации. Мы же, повторяю, не идем против законов природы. А поэтому извольте дать всю необходимую информацию.

ГИ. А что такое «необходимая информация»? И как отличить ее от любой другой?

ОЧ (скучным менторским голосом). Необходимой информацией в данном случае являются все сведения, данные и связи, влияющие на последствия принимаемого вами решения. Я ясно выражаюсь?

ГИ (разочарованно). Ну-у! Если я соберу такую уйму ценной информации, то, проанализировав ее, смогу сам оценить все последствия.

ОЧ (нарочно бодро). Вот и великолепно! Занимайтесь этим сами и не загружайте мелкими вопросами нашу солидную фирму!

ГИ. Постойте! Если, как вы выражаетесь, служите в солидной фирме, то объясните, что же может ваша фирма из того, что не могу я?

ОЧ (усмехнувшись). Ну куда вам с вашими ничтожными человеческими возможностями. Что вы можете? Толком и считать-то не умеете! Не говоря о том, чтобы запомнить небольшой массив чисел. Единственно, что вас немного извиняет, так это интуиция, которая непонятно как, но иногда позволяет вам принимать разумные реше-

ния. Но ведь это далеко не всегда! Слишком часто ваши интуитивные решения со временем переименовывались в волюнтаристские. (С сарказмом.) Ваша просьба — лучший пример этому. Так что правильней было бы поставить вопрос иначе: а что можете вы, люди, из того, что делает наша фирма?

ГИ (запальчиво). Прежде чем хвастаться, все-таки расскажите-ка о реальных возможностях, которыми располагает ваша чертова фирма!

ОЧ (надменно). Попрошу без личных выпадов. (Медленно исчезает.)

ГИ (мрачно). Извините, я не хотел вас обидеть, но обиделся за человечество. (Черт знает что! Приснится же такая чертовщина. Разволновался, словно спорю наяву с этим чертом.) И все же, как насчет возможностей, только реальных, если это вас не затруднит, разумеется?

ОЧ (материализуясь снова). Ну знаете! Обидно не за себя, а за фирму. (По-деловому.) Так вот, наша фирма выполняет многочисленные и различные заказы клиентов. Что касается ваших интересов, то их может выполнить отделение ЧП фирмы, П — это прогноз (что значит Ч, надеюсь, разъяснять не надо). Отделение ЧП с помощью специальных мощных технических средств и получаемой от клиентов исходной информации может прогнозировать развитие интересующих их событий. Точность прогнозирования гарантируется в пределах достоверности исходной информации. Говоря проще, мы не только даем прогноз, но и указываем его вероятностные свойства, то есть оценки шансов того, что так и будет в действительности, если, разумеется, исходная информация о механизмах изменения изучаемой ситуации достоверна. Более того, мы даем динамику изменения прогнозируемой ситуации во времени...

ГИ (смущенно). Постойте, постойте! Я не понимаю вас. Объясните мне, как это делается, но попроще. (Черт с ним, признаюсь в своем полном невежестве в этом вопросе.)

ОЧ (снисходительно). Ну как бы вам объяснить популярней. Мы на специальной аппаратуре имитируем развитие исходной ситуации. Если вариантов развития много, то мы моделируем наиболее вероятные. Так мы получаем несколько разных окончательных ситуаций. Каждая из них может реализоваться в жизни, но с различными вероятностями. Эти вероятности мы умеем оценивать. Поэтому прогнозом является описание каждой оконча-

тельной ситуации и оценка ее достоверности, то есть вероятность того, что она реализуется в жизни.

ГИ (оторопело). М-м-да-а-а! Вы действительно много умеете... А что это за «специальная аппаратура», с помощью которой вы осуществляете прогнозирование?

ОЧ (уклоняясь). Эта аппаратура имеет название... ЧВМ.

ГИ (догадываясь). ВМ — это «вычислительная машина»?

ОЧ (смущенно). Да. Но впереди стоит не Э, а Ч!

ГИ (улыбаясь). С аппаратурой все ясно. Теперь о методе...

ОЧ (поспешно). Никаких подробностей о методе прогнозирования фирма не сообщает. И вообще мы с вами заговорились. (Начинает исчезать.)

ГИ. Постойте, где хоть можно познакомиться с этим методом? Исчез!

Главный инженер проснулся и подумал, приснится же такое! А впрочем, что-то в этом черте было. Да и говорил он здраво. Нет, сон явно полезный, только вот ничего он не ответил. Главный инженер невольно посмотрел на стул, где во сне сидел черт и... увидел книгу. На ее обложке четкими буквами было написано...

Имитационное моделирование

Все то, о чем так таинственно говорил и умалчивал черт, приснившийся нашему герою, интенсивно разрабатывается одним из направлений современной науки, которое называют имитационным моделированием. Это новое направление в развитии метода Монте-Карло возникло сравнительно недавно. И вызвано к жизни очень важной практической потребностью — определить будущие последствия наших сегодняшних решений. Само название метода говорит о его облике: это моделирование поведения объекта путем имитации процесса его функционирования.

Возможность моделировать поведение любого интересующего нас объекта связано с любопытной особенностью наших знаний. Дело в том, что мы обычно хорошо представляем локальное поведение процесса, то есть то, как он будет происходить в конкретные моменты времени; но плохо оцениваем его целостные интегральные свойства. А ведь именно эти свойства нас больше всего и интересуют.

Например, чтобы определить время, необходимое для изготовления какой-то новой детали, рассматривают каждый этап ее обработки и сначала определяют время каждого этапа (это сделать легко, так как такие или аналогичные этапы встречались ранее при обработке других деталей). Останется только сложить время всех этапов, и получим искомую величину трудоемкости изготовления данной детали.

В этом естественном подходе есть одно важное обстоятельство. Этапы обработки этой детали или встречались при обработке других деталей и их трудоемкость можно определить по аналогии, или настолько просты, что их трудоемкость легко определить несложными вычислениями.

Таким образом, зная локальные свойства процесса, всегда можно определить его интегральные характеристики. Эта идея не нова. В математике давно разработаны и исследованы так называемые дифференциальные уравнения. Смысл их заключается в том, что записываются выражения для скоростей изменения параметров процесса — это локальное свойство. Решение дифференциального уравнения заключается в определении всей траектории изменения параметров изучаемого процесса. Итак, от локальных (дифференциальных) свойств процесса к его целостным (интегральным) свойствам.

В имитационном моделировании так же должны быть заданы локальные свойства процесса, а само моделирование дает возможность по этим локальным свойствам определить свойства процесса в целом, то есть его интегральные свойства, которые и представляют особый интерес.

Все как в жизни!

Таков девиз имитационного моделирования. Если, например, речь идет о времени обработки какой-то новой детали, то при имитационном моделировании этой обработки должны быть учтены все обстоятельства, которые могут возникнуть при реальной обработке. Например, задержки из-за необходимости замены резца, ремонта станка и т. д. Зная, как ведут себя эти задержки, можно с помощью ЭВМ определить общее время изготовления детали.

Зачем же нужна ЭВМ? Не проще ли сложить эти числа столбиком, и дело с концом?

Для однократного моделирования процесса ЭВМ действительно не нужна. Но при однократном моделирова-

нии будет нарушен принцип «все как в жизни», так как далеко не каждый раз ломается станок и меняют резцы. Вот и получается, что для того, чтобы соблюсти этот принцип, нужно многократно моделировать процесс — именно для этого и нужна ЭВМ. Результаты каждого конкретного моделирования будут отличаться друг от друга так же, как отличаются в жизни процессы изготовления разных деталей в одной и той же партии (в какой-то момент понадобилось сменить резец, и поэтому время обработки детали несколько увеличилось, а при ремонте станка оно увеличивается значительно).

Моделируя этот процесс, мы должны моделировать и все случайности, которые происходят в жизни. Вот здесь нам и понадобится метод Монте-Карло, созданный именно для этого.

В результате такого моделирования мы получим различные времена изготовления детали. Что с ними можно делать?

Да все, как в жизни! Можно определить среднее время изготовления этой детали. Для этого достаточно осреднить полученные числа. Или оценить вероятность того, что время изготовления детали превысит заданное. И т. д.

Итак, если уметь имитационно моделировать любой вариант процесса, то дальнейшая обработка результатов моделирования не представляет трудности — это надо делать так, как будто перед нами не результаты моделирования, а протоколы записи реальных процессов.

Если уметь! А что значит уметь имитационно моделировать? Каким образом получать различные варианты прохождения имитируемого процесса? Именно для этого и используется метод Монте-Карло или, как его чаще называют в этом случае, метод статистических испытаний.

Техника Монте-Карло

Эта техника раскрывает «кухню» метода, то есть показывает, каким образом образуются различные варианты при имитационном моделировании. Для этого прежде всего надо уметь моделировать случайные события. Таким событием, например, является загруженность станка к моменту подхода детали: будет он загружен работой или нет— это случайное событие, которое определяется вероятностью P того, что станок был загружен. (Напомним, что вероятностью называют число, характеризующее

степень достоверности утверждения, что интересующее нас событие произойдет. Если $P=0$, то событие не произойдет никогда, а при $P=1$ оно происходит каждый раз. Если же $0<P<1$, то это событие случайно, причем оно происходит тем чаще, чем больше величина вероятности P.

Рассмотрим частные случаи. Если $P=1/2$, то есть событие происходит и не происходит с одинаковой вероятностью, то генератором такой случайности является подбрасываемая монетка. Договоримся, что появление цифры эквивалентно тому, что произошло наше событие, а герб свидетельствует о том, что оно не произошло. Вот и готов генератор случайного события!

Другим генератором является игральная кость. Для того чтобы моделировать события, происходящие с вероятностью $P = \frac{1}{6}$, надо следить за выпадением, например, единицы, что и будет означать появление события с требуемой вероятностью $\frac{1}{6}$. Для моделирования случайного события с вероятностью $P=\frac{2}{3}$ достаточно считать, что оно происходит при выпадении, например, единицы и двойки и т. д.

Монте-карловская рулетка так же является генератором случайных событий, происходящих с вероятностью $P=\frac{1}{100}$. Лототрон генерирует случайные события с вероятностью $P=\frac{1}{49}$ или $P=\frac{1}{36}$ (речь идет о первом шарике, так как эта вероятность изменяется с уменьшением числа шариков в лототроне).

Все это примеры физических датчиков случайных событий. Их преимущество лишь в наглядности (работу лототрона показывали по телевизору, чтобы каждый мог видеть, что выпадение шариков совершенно случайно). Но наглядность хотя и хорошее свойство, но далеко не единственное. Эти датчики работают крайне медленно, и потребуется специальное устройство, чтобы ввести их результаты в ЭВМ, так как именно ЭВМ предстоит имитировать интересующий нас реальный процесс и для этого ей нужны случайные события с заданными свойствами в виде вероятности и т. д.

Поэтому надо иметь датчик случайных событий в виде подпрограммы ЭВМ, к которой можно было бы обра-

щаться каждый раз, когда нужно определить реализацию случайного события с заданной вероятностью P.

Такой датчик устроен очень просто. Его основой являются псевдослучайные числа (процедура их получения была рассмотрена в предыдущей главе). Будем для простоты считать, что эти псевдослучайные числа двузначны, то есть имеют лишь два знака после запятой (их легко получить, если остальные знаки просто отбросить). Тогда работу датчика случайных событий с заданной вероятностью P (ее также будем задавать двумя цифрами после запятой) можно проиллюстрировать на монте-карловской рулетке в следующей игре. Пусть величина P (точнее, ее знаки после запятой) определяет номер лунки на поле рулетки. Нас будет интересовать не этот номер, а все номера меньше его. Если шарик упадет в лунку с этими номерами, то будем считать, что интересующее нас событие произошло. Если нет, то не произошло. Вот и все!

Легко заметить, что вероятность попадания шарика в лунки с номерами меньше, чем $100\ P$ (это уже целое двузначное число), равно P, то есть вероятности интересующего нас события.

На ЭВМ этот датчик работает еще проще. Сначала вырабатывается случайное число x (напомним, что оно между нулем и единицей), затем оно сравнивается с P. Если x окажется меньше P, то считается, что событие произошло, и не произошло, если x больше или равно P.

Вспомним о нашем главном инженере. Его заботы сводились к прогнозированию последствия ответственного решения — «брать заказ». Чтобы воспользоваться методом имитационного моделирования в этом случае, нужно имитировать весь процесс выполнения этого заказа. А для этого следует изучить все факторы, влияющие на процесс производства заказа, и построить их локальные модели. Например, для выполнения заказа нужно получить к заданному сроку со смежного завода определенные материалы, детали и узлы. А этот завод, по опыту, почти никогда не выполнял поставки вовремя и обычно задерживал их на неделю. Тогда локальная модель для этого фактора (поставки) будет описывать величину задержки поставок с оценкой вероятности такой задержки:

$$\tau = \begin{cases} 0 \text{ с вероятностью } P, \\ 1 \text{ неделя в остальных случаях,} \end{cases}$$

($\tau = 0$ означает, что поставка сделана в срок).

Здесь величина вероятности P (это вероятность вы-

полнения заказа) определяется снабженцами, имеющими дело с этим заводом. Кому, как не им, знать, как часто и на сколько срывает поставки этот поставщик.

Если во время производства происходит выход из строя оборудования, на котором выполняется заказ, то этот фактор нельзя не учитывать при имитационном моделировании. Например, задержка выполнения в связи с поломкой и ремонтом уникального станка (который не может быть заменен другим) может быть представлена так:

$$\tau = \begin{cases} O \text{ с вероятностью } P, \\ \text{а — в остальных случаях.} \end{cases}$$

Это означает, что с вероятностью P станок исправно работает, а при неисправности ремонтируется все время, равное a. Значение вероятности P и времени a должен дать начальник цеха, в котором находится этот станок (он-то лучше всех знает, как часто ломается станок и как долго его надо ремонтировать).

Если какой-то цех работает неритмично и иногда допускает срывы в выполнении заданий (скажем, потому, что его начальник еще не имеет должного опыта), то это обстоятельство также должно быть учтено в модели. Например, по последней формуле, где P — вероятность срыва плана, а a — задержка выполнения заказа при этом срыве, эти параметры должен определить сам главный инженер (ведь только он на своем горьком опыте знает, что можно ожидать от этого цеха. Эти знания и отражаются в двух числах P и a).

Легко заметить, что такая имитационная модель завода будет чрезвычайно сложной и громоздкой. Ни одному, даже самому умному, человеку не удается представить результаты работы такой модели. Да это и не нужно. Эта модель создана для ЭВМ, которая может многократно «разыграть» эту модель методом Монте-Карло и определять время выполнения данного заказа на заводе в каждом прогоне.

Каждый такой прогон имитационной модели дает возможность определить время выполнения заказа при различных значениях случайных факторов, действующих в реальном процессе выполнения этого заказа. Они несут очень важную информацию. Так, с их помощью можно определить, каково среднее время, необходимое для всей работы. Далее можно оценить риск срыва директивного срока, то есть вероятность того, что в реаль-

ном процессе он будет нарушен. Например, из 20 прогонов в четырех время выполнения превышало допустимое. Тогда риск срыва равен $4/20 = 0{,}2$, то есть 20 процентов. И, наконец, анализ прогонов, нарушающих директивный срок, дает возможность узнать, за счет чего же произошло это нарушение, и принять меры, чтобы этого не было в реальном процессе выполнения задания, например, отремонтировать или заменить старый станок, выходящий из строя, сменить начальника цеха, допускающего срывы программы, договориться с недисциплинированными поставщиками или пригрозить санкциями и т. п.

Читатель наверняка уже подумал, что к подобным решениям можно было бы прийти и без имитационной модели. Ведь ясно, что старые станки надо менять, как и не справляющихся с работой начальников цехов и плохих смежников, поставляющих нужные детали с опозданием.

Конечно же, все это так! Но любой руководитель (да и не только он) всегда и везде работает в условиях ограниченных ресурсов времени, оборудования, ремонтников, кадров для должности начальника цеха, поставщиков, требуемых деталей и т. д. и т. п. Вот и получается, что для распределения этих ресурсов ему нужно знать, в какой мере это повлияет на выполнение заказа. И только имитационная модель сможет дать ответ на эти вопросы и оценить эффективность управленческих решений.

Так имитационная модель становится средством управления объектом, с помощью которого можно добиться выполнения очень сложных и трудных целей и довольно тонко регулировать поведение сложнейших процессов.

Но за все надо платить. Приходится платить и за возможности, которые предоставляет имитационное моделирование: предвидеть будущее и воздействовать на него. Плата здесь не столько дорогая, сколько громоздкая. Это прежде всего информация о том, что же может быть «на самом деле» (что и как поломается, не получится, сорвется, разрушится и т. д.) и, что самое трудное, с какой вероятностью произойдут эти события. Нужно иметь большой опыт и знания о моделируемом процессе, чтобы дать эти сведения. Так что для того, чтобы создать имитационную модель, нужно много знать и изрядно потрудиться! Это занятие не для профанов и бездельников. (Часто приходится слышать, что все свои заботы можно возложить на ЭВМ. Пора проститься с этой сладкой мечтой. Общение с ЭВМ всегда требует и будет требо-

вать знаний и должного усердия. Особенно при имитационном моделировании.)

Совершенно аналогично использование имитационного моделирования в сельском хозяйстве, экономике, научной работе и даже... в личной жизни, например, планируя поездку на автомобиле при дефиците времени.

Подводя итог, заметим, что метод Монте-Карло заключается, по сути дела, в моделировании с помощью ЭВМ процессов, в которых присутствует элемент случайности. Ввиду того, что результат однократного моделирования всегда случаен, необходимо многократное «проигрывание» на модели процесса, для чего и нужна вычислительная машина. Вся трудность метода заключается в составлении модели процесса, и если вам удастся ее сделать, то решить задачу методом Монте-Карло уже не представа-



вит большого труда, надо только запрограммировать модель и передать программу на быстродействующую вычислительную машину, которая сделает остальное дело.

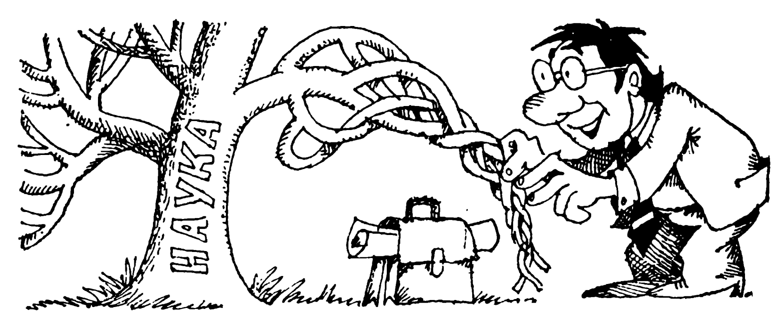
Именно поэтому метод Монте-Карло часто называют методом математического экспериментирования, подчеркивая тем самым, что каждый «прогон» на модели процесса, по сути дела, является экспериментом, но не реальным, а математическим, то есть экспериментом с математической моделью изучаемого процесса, а не с реальным объектом.

Есть еще одно имя у этого метода: его иногда называют методом статистических испытаний, подчеркивая тем самым статистический (случайный) характер полученного решения.

В заключение следует еще раз отметить, что метод Монте-Карло был создан и получил развитие лишь после того, как появились ЭВМ — быстродействующие электронные вычислительные машины. «Ручное» применение метода лишено всякого смысла, так как он связан с большим числом однотипных вычислений, которые под силу только машине.

Как одному человеку, даже самому сильному, не под силу построить пирамиду Хеопса, так в одиночку, без вычислительной машины, человек не может работать методом Монте-Карло.

Монте-Карло — метод больших и скоростных вычислительных машин!



глава четвертая.

СЛУЧАЙНОСТЬ В ТВОРЧЕСТВЕ

О, как часто стрела по воле случая
попадает в цель, о которой
не ведает стрелок.

В. Скотт

Для нашего разговора о важности случайности в творческих процессах ограничимся такими наиболее близкими автору областями деятельности, как наука популяризация и фантастика. Это вовсе не означает, что случайность не влияет на творчество в литературе, музыке, танце и т. д. Просто автору в своей области проще показать то, что он хочет. Начнем с науки.

Наука: процессы дифференциации и интеграции

Одним из характернейших процессов науки вообще является ее бурная дифференциация, то есть дробление научных направлений. Рост науки напоминает рост дерева. От ее мощного ствола отделяются ветви фундаментальных направлений (например, математика, физика, химия и т. д.). Каждая из этих ветвей разделяется на ветки (так, физика — на физику твердого тела, атомную, ядерную, молекулярную и т. п. физику). Далее появляются веточки, сучки, сучочки и т. д., все уже и все специфичней (физика кристаллов, полупроводников, металлов, полимеров и т. д.).

Дифференциация отражает объективную тенденцию развития науки, связанную с необходимостью углубления наших знаний об окружающем мире. Наука мало стоила бы, если бы она не стремилась к углублению.

Однако указанная дифференциация имеет и теневую

сторону. Она приводит к сверхспециализации научных направлений, что порождает специфические языки общения, так называемые сленги. Научный сленг (жаргон) образуется из сугубо профессиональных терминов и понятий, с которыми постоянно приходится иметь дело членам научной группы — специалистам одного направления. Этот язык позволяет им хорошо понимать друг друга при минимальных затратах на объяснения. В этом смысле научный сленг мало чем отличается ну, скажем, от воровского жаргона, отражающего интересы преступного клана. Более того, существует вполне обоснованное мнение, что научное направление можно считать сложившимся именно тогда, когда появился собственный сленг, который облегчает общение внутри группы, — для этого он и создается. Однако эта же тенденция приводит к «вавилонскому столпотворению» в науке, когда соседи по лаборатории перестают понимать друг друга.

С другой стороны, процесс сверхспециализации может, по остроумному выражению Бернарда Шоу, привести к появлению специалистов о «ни о чем». Здесь известная поговорка, что-де «нужно знать все о немногом и немного обо всем», вырождается в формулу «все о ни о чем и ничего обо всем» — неплохой девиз для бездельников!

Нельзя не вспомнить известное и меткое выражение Козьмы Пруткова: «Всякий специалист подобен флюсу — его полнота односторонняя».

Все это не может не вызвать беспокойства. Но, к счастью, кроме дифференциации, в науке происходят и процессы интеграции, объединения различных направлений в одно. Сучки и ветви дерева науки, о которых мы только что толковали, не сращиваются друг с другом только в природе, но не в науке...

Чем вызывается интеграция? В основном — двумя причинами. Прежде всего — практической необходимостью, нашими человеческими потребностями. Множество наших проблем носит комплексный характер. Они могут быть решены лишь объединенными усилиями специалистов разных направлений. Объединение этих усилий и дает начало таким новым наукам, как, например, кибернетика, квантовая химия или молекулярная биология.

Процесс интеграции научных направлений обусловлен еще и логикой развития самой науки, ее внутренними потребностями, необходимостью обобщений. Одной из основных целей науки является нахождение общего в различных объектах. Так, понятие массы свойственно всем

материальным объектам, а феномен управления присущ не только машинам, но и живым организмам и обществу. Выделение его в самостоятельный объект исследований привело к появлению кибернетики как науки.

Немного из предыстории кибернетики

Свое триумфальное шествие кибернетика начала в 1948 году с выходом в свет книги американского математика Норберта Винера «Кибернетика». В этой книге он обратил внимание на математическую общность процессов управления машиной и организмом. Будучи математиком, Н. Винер много занимался математическими исследованиями в области автоматического управления машинами. Эти исследования привели к созданию прибора для автоматического управления зенитным огнем, что было очень важно для успешной борьбы союзников.

В 1945 году его пригласил к себе в лабораторию мексиканский биолог А. Розенблют с просьбой попытаться описать математически работу сердечной мышцы. Любознательный Н. Винер согласился и после тщательных исследований создал математическую модель работы сердечной мышцы. Каково же было его удивление, когда он заметил, что известные ему уравнения, описывающие процесс автоматического управления зенитным огнем, и только что полученные уравнения модели сердечной мышцы совпадают!

К этому можно было отнестись как к забавному случайному совпадению, которых в жизни множество, и использовать лишь в качестве одной из тем светской беседы за коктейлем в кругу своих коллег. Можно было и просто не обратить внимания — мало ли каких чудесных совпадений не бывает в нашей беспокойной жизни!

Но Н. Винер в этом «забавном» совпадении увидел будущую науку — кибернетику, науку об управлении объектами любой физической природы.

Важность такого обобщения легко понять, если вспомнить, что управлением как процессом достижения поставленных целей применительно к конкретным объектам занимались с древних времен. Но это управление было накрепко связано с содержательным, конкретным смыслом объекта. Таковы процессы управления кораблем, лечения больных (лечение — это медицинский синоним управления), воспитания детей, управления стрельбой из лука, пищали, пушки, создания материалов с задан-

ными свойствами, управления машинами и многие другие. Но все эти «управления» были неразрывно связаны с объектами управления. Действительно, чем может поделиться кормчий с врачом? Или педагог с кузнецом? Разве что пожаловаться на семейные неурядицы! Ведь всякому «ясно», что водить корабль и врачевать или воспитывать и ковать — занятия совершенно разные. Так думали до Н. Винера. А оказалось, что занятие одно и то же, разный лишь объект приложения этого занятия. Чтобы понять это, необходимо было суметь отделить занятие от объекта, разорвать эту вековую связь, которая мешает увидеть феномен управления в «чистом» виде. Н. Винер сделал это впервые и стал изучать управление само по себе, при этом вместо объекта стала фигурировать его математическая модель, которая могла описывать и поведение сердечной мышцы, и движение самолета, и любой другой объект управления.

Эта внутренняя потребность науки в обобщениях и является второй причиной ее интеграции. Чтобы осуществить интеграцию, необходимо отвлечься от специфики объекта, иметь «широкий взгляд на вещи», быть эрудированным не только в смежных, но и в отдаленных областях науки. Причем поиск таких отдаленных областей, которые неожиданным образом связываются с другими, и обеспечивает успех интеграции. Именно здесь случайность и оказывает свое решающее воздействие на процесс интеграции. Можно даже точно указать механизм проникновения случайности: это ассоциации исследователя.

Ассоциации являются отражением в памяти человека связей между предметами или явлениями, с которыми он сталкивался в реальной действительности. Очевидно, что характер этих ассоциаций у всех примерно одинаков, поскольку мы живем в одном мире, но одновременно и несет черты сугубо индивидуальные, что зависит от индивидуального опыта, склонностей и потребностей человека. Примером универсальных ассоциаций являются бессмысленные слова «малюма» и «такета», которые у всех вызывают одинаковые ассоциации. Если «малюма» — это по ассоциации что-то круглое, мягкое, теплое, то «такета» — острое, резкое, твердое, холодное.

Отличие ассоциаций может носить профессиональные свойства. Так, например, ассоциации со словом «функция» будут различные у математика, администратора и медика. Математик тут же вспомнит зависимость между

переменными, администратор — круг своих обязанностей и подчиненных, а медик под функцией подразумевает специфическую деятельность организма, его органов, тканей и клеток. Это профессиональные ассоциации — они одинаковы у представителей одной профессии.

Индивидуальные же ассоциации случайны, поскольку отражают прошлое взаимодействие индивида с действительностью, которое уникально и непредсказуемо, одним словом, может считаться случайным. Попробуйте, например, спросить своих знакомых, какое слово больше всего подходит к заданному (его можно выбрать наугад, ткнув пальцем в любую страницу книги). Наверняка это будут разные слова, отражающие индивидуальные ассоциации опрашиваемых.

Автор провел такой эксперимент со словом «лампа». Вот какие слова были получены: люстра, диван (наверно, лампа висела над диваном — ассоциация по месту расположения), колобок (это девочка трех лет — ассоциация по форме предмета), стол, книга, светильник...

Так вот, именно случайный характер ассоциаций и позволяет установить дальние связи между различными явлениями, что совершенно необходимо для интеграции науки.

Однако для создания нового интегрального направления недостаточно, по меткому выражению Н. Винера, «...объединить два мозга в одной комнате — их необходимо объединить в одной голове». Иными словами, биолог должен иметь представление о возможностях химии, а химик — знать нужды и трудности биологии. Поэтому им обоим необходимо ознакомиться с методами своего «смежника» и относиться к ним с должным уважением. Для этого нужно преодолеть языковой барьер (все тот же сленг!), то есть уметь понимать друг друга и общаться друг с другом с минимальным употреблением специальных терминов и понятий. И необходимость широкого взгляда, и потребность понимать друг друга сводятся к проблеме изложения специальных вопросов на общедоступном языке, короче, нужна...

Популяризация

Всем известно, что популяризация состоит в доступном изложении «недоступных» идей. Однако в зависимости от характера «недоступности» популяризация может выступать в двух качествах.

С одной стороны, она может популяризировать вещи, факты и идеи, давно и досконально известные науке, но малоизвестные широким кругам читателей. Задача такой популяризации заключается в широком освещении фактов и идей по принципу «знаете ли вы, что...». Эту важную и почетную просветительскую роль популяризации трудно переоценить. Именно такой она преимущественно была до настоящего времени.

Но потребности интеграции в науке породили качественно новое направление популяризации, которое заключается в освещении новых фактов и идей по принципу «вы не знаете, что...». Здесь популяризируются факты и идеи, доселе не обсуждавшиеся на популярном уровне потому, что их просто еще не существовало. Важность этого обстоятельства заключается в том, что популяризацией в данном случае, как правило, занимается сам ученый, получивший этот результат, или его ближайшие коллеги.

Однако такое непосредственное общение с источником ценной информации таит в себе и некоторое противоречие...

Существует распространенное мнение, что популяризация науки — удел немногих ученых, обладающих своеобразным «талантом» популяризации. А если такого таланта нет, то лучше, дескать, не браться за популярное изложение даже в своей собственной области — будет и скучно и, главное, непонятно. В действительности же неумение ясно и доходчиво (а следовательно, интересно) рассказать о своем предмете скорее свидетельствует о недостаточно глубоком понимании предмета самим рассказчиком!

Известно, что все научные идеи в своей основе просты и прозрачны. Однако эта прозрачность приходит через глубокое понимание, которое (увы!) далеко не всегда и сразу достигается в науке. На первых порах открытие, грубо говоря, непонятно самому открывателю. Какая там уж популяризация, если специалисты в этой области с трудом понимают, о чем речь!

И вот именно тогда необходимость в популяризации, как ни странно, становится наиболее острой. Один знакомый автора не садился писать научную статью, прежде чем ее содержание не стало понятным его домашним, которые не имели ни малейшего отношения к его науке. Их понимание сути дела было для него своеобразным тестом: «если они поняли, то, значит, я тоже разобрался».

С другой стороны, процесс разъяснения не является пассивным. Здесь необходимо привлекать новые соображения и аргументы, что делает его творческим процессом. Академик П. Капица как-то сказал: «...когда ищешь форму ясного описания того или иного вопроса, часто приходят новые идеи». Так образуется одна из обратных связей от популяризации к науке.

И этот процесс легко объяснить все теми же случайными ассоциациями. Действительно, желая сделать доступной какую-то нетривиальную мысль, ученый обычно обращается к аналогиям, сходству, подобию этой мысли другой, уже хорошо известной. Например, описывая электромагнитные колебания, естественно обратиться к колебаниям маятника. Между ними есть соотношение аналогии.

Но аналогия — очень строгое понятие и требует чрезвычайно жестких соотношений между предметом и его аналогом. Именно поэтому при популяризации обращаются обычно к метафорам, то есть образным понятиям, которые могут быть достаточно далеки от исходного и нового понятия или объекта. Вот именно здесь и срабатывает механизм случайных ассоциаций, которые позволяют привлечь к этому объекту новые и неожиданные (ввиду их случайности) связи и отношения с другими объектами. А ведь это и образует новое в познании изучаемого объекта.

Так или иначе, но популяризация новых идей, фактов и открытий стала потребностью научных работников (а не филантропией, как об этом часто думают некоторые редакционные работники научно-популярных изданий). В этом состоит ее первая новая черта.

Вторая черта современной научной популяризации состоит в том, что ее потребителем все более и более становятся сами научные работники. Этому способствует объективный процесс интеграции науки, рассмотренный выше. Популяризация выступает в роли связующего звена между различными направлениями науки. Не будь ее, любому исследователю пришлось бы оставаться узким специалистом с ограниченным кругозором. Это, естественно, сказывается на эффективности и интенсивности его профессиональной работы.

В мире, например, издается несколько десятков тысяч (!) медицинских журналов. Даже прочитывая по сто журналов в день, не угнаться за развитием одной лишь медицины. Нельзя ознакомиться с состоянием «чужой»

проблемы по научным журналам — они для этого «слишком научны». Нужна популяризация! Это и есть вторая новая черта современной научно-популярной литературы — ее начали читать научные работники.

Замечено, что интерес, проявляемый к другим областям науки, стимулирует деятельность в своей узкой области. Ученые, которые интересуются не только смежными, но и дальними областями науки, выгодно отличаются от «неинтересующихся» высокой производительностью научной работы. Это проявляется, например, в большом числе статей и монографий, обилии ссылок на их работы, большом числе учеников и последователей и т. д.

Если для неспециалистов чтение научно-популярной литературы является лишь средством удовлетворения своей любознательности, то для специалистов оно стало повседневной необходимостью. Именно это обстоятельство и изменяет структуру современной научной популяризации в направлении освещения результатов и методов новейших исследований. Авторский и читательский контингенты научно-популярной литературы все более деформируются в сторону увеличения числа творческих научных работников.

К чему в конце концов приведет эта тенденция, сказать сейчас трудно. Но, во всяком случае, это должно изменить лицо некоторых научно-популярных и научных журналов или привести к появлению новых журналов, где научно-популярное изложение будет ориентировано на научных работников (примерами таких журналов являются известные «Природа», «Наука и жизнь», «Наука в СССР» и др.).

Однако для плодотворной творческой работы ученого недостаточно одних лишь знаний. Необходимо уметь эффективно обращаться с этими знаниями. Здесь уместно отметить, что появление новых идей в науке всегда связано с нарушением какого-то запрета, который установила «старая» наука. Эти идеи обычно «нелогичны» потому, что почти никогда не выводятся из «старых». Это своеобразный прорыв в логике старой науки. И только потом, после тщательной разработки и изучения, оказывается, что эта идея вполне логична и органична. Однако в момент своего возникновения она всегда крамольна и еретична... (Опытные исследователи хорошо знают это и всегда проверяют все новое на «крамольность». Вспомним, как однажды Нильс Бор отклонил одну физи-

ческую теорию по причине ее недостаточной «безумности».)

Для творческого ученого, таким образом, совершенно необходимо уметь генерировать «сумасшедшие» идеи. А это очень трудное занятие, особенно для логически мыслящего человека, каким и является всякий ученый.

Более того, сам по себе процесс познания, то есть выявления новых закономерностей (мы его назвали познанием в узком смысле), требует преодоления старых представлений, которые выступают в виде предрассудков. А. Бебель очень точно заметил, что «освобождение от предрассудков — первое требование для познания истины».

Вот и получается, что и в процессе познания окружающего мира, и при «сотворении» мира науки ученым необходимо иметь средства преодоления запретов и предрассудков. И неоценимую помощь в этом оказывает...

Фантастика

Фантастика — это прежде всего прорыв в логике существующего мира, столь необходимый и трудный для всякого ученого. Писатель-фантаст не заботится о правдоподобности или обоснованности скачка — он совершает его и начинает творить в новом мире. Этим существенно отличается характер мышления ученого и писателя. Любопытно, что именно поэтому хороший ученый очень редко может быть хорошим фантастом. Так, Н. Винер был весьма посредственным фантастом. Палеонтолог И. Ефремов стал известным фантастом после того, как перестал заниматься научной работой. Биохимик А. Азимов известен всем прежде всего своими научно-фантастическими произведениями, потом как популяризатор науки; как биохимик он знаком лишь очень узкому кругу специалистов.

В своей повседневной научной работе ученый ограничен огромным количеством всякого рода запретов, установленных наукой. Тут и оба начала термодинамики, все законы сохранения и масса других, не столь почетных, но с которыми тем не менее необходимо считаться. Заниматься научной работой означает во многом уметь обходить эти запреты (нарушать их нельзя — вот и приходится обходить).



Но не эти ограничения страшны. Самые «страшные» запреты имеют психологический характер. Это своеобразные табу, причину появления которых часто трудно определить. Здесь и преклонение перед авторитетами живыми («сам Иван Иванович скептически отозвался о перспективности работ в этом направлении») и мертвыми («еще Пуанкаре указывал на неразрешимость аналогичной проблемы»). Запреты иногда построены по ложной аналогии («это похоже на создание вечного двигателя») или просто опираются на аллегорию («коллектив автоматов? Да ведь это социология, а мы инженеры и не компетентны в этой области»).

И наконец, самоограничения, связанные с инертностью, стандартностью и трафаретностью нашего мышления, его рутиной. Это предрассудки, молчаливо возведенные в ранг закона. Вот пример типичного самоограничения. Попробуйте из шести спичек сложить четыре равносторонних треугольника. Не получается? Невозможно? Оказывается, возможно. А не получается лишь му, что вы сами себя ограничили. Вы пытались решить задачу на плоскости? Но перейдите к объему и получите трехгранную пирамиду, решающую поставленную задачу.

Преодоление такого рода

ложных запретов является основой для эффективного научного, да и не только научного, творчества. Именно в этом помогает чтение научной фантастики.

Указанная мысль очень хорошо иллюстрирована в научно-фантастической повести Р. Джоунса «Уровень шума», где ученым показывают специально фальсифицированный фильм о левитации (полете человека с помощью волевого усилия). В фильме был «зафиксирован» случай левитации, якобы произошедший в действительности. Ученые хорошо «знают», что левитация невозможна, хотя и нет законов, ее запрещающих. Фильм заставляет их пересмотреть основы своих знаний и преодолеть психологический барьер невозможности, что приводит к открытию антигравитации. Здесь очень тонко подмечена связь между умением преодолевать психологический барьер, воздвигнутый не природой, а психикой, и научно-техническим творчеством.

Но умение и возможность преодолевать запреты вовсе не всегда связаны с фальсификацией или, просто говоря, обманом, к которому прибегли герои этой повести. Для этого можно воспользоваться случайностью в виде все тех же ассоциаций. Именно случайность ассоциаций позволяет преодолеть барьеры на пути к новым изобретениям и открытиям. Как это сделать, будет рассказано в конце этой главы.

А детектив!

Мы рассмотрели процессы интеграции в науке, важность популяризации и необходимость фантастики. По все той же ассоциации невольно вспоминается, пожалуй, самый популярный жанр — детектив. Давайте рассмотрим и его, тем более что он имеет самое непосредственное отношение к случайности, которой посвящена книга.

Мы уже говорили о том, как важно ученому читать научно-популярные статьи — без этого он просто не сможет понять, что творится за пределами его области знания. Нужно ему и писать их — при этом новый научный результат осмысливается исследователем по-новому, с неожиданных для него ракурсов, что открывает ему новые стороны изучаемого явления. И наконец, творческому ученому совершенно необходима фантазия, без которой ему никогда не оторваться от прописных истин и не

удастся сделать в науке открытия ни большого, ни самого маленького. (А. Пуанкаре как-то сказал об одном своем ученике, который бросил математику и начал писать стихи: «Я всегда считал, что у него мало фантазии».) Вот эту столь необходимую для научной работы фантазию ученый и черпает в научно-фантастических произведениях. Они помогают ему преодолеть многочисленные барьеры, сквозь которые приходится «прорываться» при поиске новых закономерностей нашего мира.

Итак, чтение научно-популярной и фантастической литературы необходимо для современного ученого.

А детектив? Нужен ли он исследователю? Все мы любим читать детективную литературу. С чем связана эта любовь? Что это, интеллектуальная разрядка? Ностальгия по приключениям? Или что-то большее?

На эти вопросы нельзя ответить однозначно и прямолинейно. Дело в том, что открытие научной истины происходит в результате сложного взаимодействия ученого с наблюдаемым им явлением и с окружающей средой, в том числе и социальной. В процессе взаимодействия на ученого обрушивается мощный поток информации, в котором ему предстоит найти капли интересующих его сведений. Найти! Не сродни ли этот поиск кропотливой работе следователя или разведчика в увлекательном детективе?

Для ответа на этот вопрос давайте сравним работу ученого и детектива. И тот и другой ищут истину. Поэтому прежде всего давайте разберемся...

Что есть истина?

И ученый и детектив ищут причины тех последствий, которые они наблюдают. Для детектива такими последствиями являются следы, оставленные на месте преступления, а для ученого — показания приборов, с помощью которых он исследует новое интересующее его явление. Взаимодействие исследователя (ученого или детектива) с изучаемым им явлением (преступлением) происходит в результате наблюдения следствий изучаемого явления (для детектива — преступления), которые вызываются определенными причинами. Для того чтобы построить модель изучаемого явления (а для детектива — воссоздать картину преступления), необходимо связать при-

чины и следствия явления. Эта связь и есть модель явления.

Таким образом, под моделью понимаем такой способ рассуждений, с помощью которого логично связываются наблюдаемые причины и их последствия. Символически модель можно изобразить в виде буквы f в выражении, которым мы не раз уже пользовались:

$$y = f(x).$$

Модель f, следовательно, представляет собой цепочку умозаключений, с помощью которых можно по причине x определить («вычислить») следствие y.

Приведем примеры таких моделей. Закон естественного отбора Ч. Дарвина (с наибольшей вероятностью выживает и закрепляет свои свойства в потомстве наиболее приспособленный) является именно такой моделью. В этом случае x — приспособленность индивидуума, а y — вероятность его выживания и, следовательно, передачи потомству своих свойств. Модель связывает эти два фактора и представляет в виде закономерности.

Известный закон Ома связывает напряжение x и ток y в электрической цепи с помощью линейной модели $y=кx$, где $к$ — проводимость цепи.

Как видно, модель f определяется тремя обстоятельствами:

1. Содержательным описанием (видом) причины x;
2. Содержательным описанием (видом) следствия y;
3. Описанием вида и характера связи f между причиной и следствием.

Обратите внимание, что причины и следствия обязательно должны быть описаны содержательно, то есть их физический смысл должен быть ясен. Связь же f может и не иметь содержательного смысла. Так, например, до сих пор непонятно, почему известный закон всемирного тяготения Ньютона имеет именно такую форму — гравитационная сила двух масс прямо пропорциональна их произведению и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Такое описание f имеет сугубо формальный характер. Закон же Дарвина имеет четкий и прозрачный «физический» смысл. Линейность закона Ома также может быть обоснована физическими соображениями. Исследователь, выявляя новую закономерность в наблюдаемом им явлении, строит модель f. Понять явление — значит построить его модель.

Итак, и ученый и детектив строят модели. Один —

изучаемого им явления, а другой — преступления. В обоих случаях модель представляет собой цепочку причинно-следственных связей. Эти связи и определяют показания приборов при изучении нового явления и следы, оставленные преступником, при восстановлении картины преступления.

Таким образом, цель у обоих одинаковая — выяснить, что же было на самом деле, то есть восстановить истину, построить модель. Это обстоятельство объединяет ученого и детектива. Дальнейший анализ показывает, что действуют при этом они по-разному.

«Коварна, но не злонамеренна»

Ученый, познавая явления, не подозревает природу в злонамеренности. Этим его отношение к исследуемому объекту отличается от отношения детектива, которому по долгу службы приходится подозревать каждого. А. Эйнштейн как-то сказал известные слова о том, что природа коварна, но не злонамеренна. Поэтому исследователь не вправе рассматривать результаты эксперимента как некую возможную подтасовку кого-то. Ему не приходит в голову, что природа хитрит с ним, и если, например, в одних и тех же условиях получаются различные результаты, то прежде всего он подозревает свою аппаратуру, а уж затем природу, считая, что он встретился со случайной помехой, а не с закономерным явлением.

Как видно, по отношению к получаемой информации детектив и ученый стоят в основном на противоположных позициях. Здесь осторожное «в основном» автор использовал потому, что при изучении так называемых «активных» объектов, то есть объектов, содержащих отдельных людей или коллективы, ученый вынужден становиться на позиции детектива. И вовсе не потому, что члены изучаемого коллектива «злонамеренны». А потому, что всякий человек, отвечая на вопросы (эти ответы и несут исходную информацию об объекте), имеет право быть субъективным, отвечать так, как по его мнению правильно. А это «правильно» далеко не всегда бывает объективным. Вот и приходится ученому исхитряться и, как детективу, подозревать объект в... необъективности.

Любопытно, что трудности, испытываемые «электронной свахой», такого же порядка. Ведь ее абоненту надо описать в анкете свой идеал. И очень часто этот идеал «списывается» с киноактрис. «Ему б кого-нибудь попроще

бы, а он... описывает стати Софи Лорен». Именно поэтому в хороших анкетах, разработанных учеными-психологами, не задают абоненту таких прямых вопросов, а стараются выявить его наклонности и вкусы обиняком, чтобы по ним найти в памяти ЭВМ анкеты его «избранниц».

А вот отношение ученого к гипотезе и детектива к версии одинаково (заметим, что слова «гипотеза» и «версия» являются разными названиями одного и того же понятия. Одно из них используется в науке, а другое — в криминалистике).

Действуют они на первый взгляд не очень логично. Выдвинув гипотезу (а в расследовании — версию), ученый (а в криминалистике — детектив) как будто старается ее опровергнуть, то есть найти факты, не совместимые с этой гипотезой. И лишь не обнаружив таковых, утверждает, что гипотеза (версия) верна. Но достаточно одного опровергающего факта, чтобы заставить исследователя (ученого или детектива) отказаться от своей гипотезы (версии). Такое поведение требует большого мужества: ведь и гипотеза и версия являются детищем ученого и детектива, и искать факты, опровергающие их, это, по меткому замечанию В. Маяковского, «становиться на горло собственной песне». А это трудно, очень трудно. Может быть, именно поэтому не слишком много хороших ученых и хороших детективов.

В этом проявляется известный принцип фальсификации, который утверждает, что гипотезу нельзя подтвердить, ее можно лишь намеренно опровергнуть (фальсифицировать). Неопровергнутая гипотеза может рассматриваться как основа для рабочей теории. Однако со временем всегда находятся факты, которые опровергают эту гипотезу, что приводит к созданию новой уточненной теории и т. д. Принцип фальсификации опирается на то, что не может быть абсолютных теорий, теорий в последней инстанции. Есть лишь пока не опровергнутые теории, которые удобно считать правильными на данном этапе развития науки. Поэтому нужно не подтверждать гипотезу (что невозможно сделать, так как для этого пришлось бы рассмотреть все случаи ее проявления), а пытаться опровергнуть ее и довольствоваться тем, что этого пока не удается сделать.

Пожалуй, самая распространенная ошибка молодых исследователей заключается в том, что, описывая свои эксперименты, они вместо слов «предложенная теория не

противоречит полученным экспериментальным данным» обычно пишут о подтверждении своей теории. Это явное нарушение принципа фальсификации.

Здесь могут возразить, что сказанное не относится к математике, которая умеет формально доказывать справедливость или ложность выдвигаемых положений в рамках исходных постулатов и правил их преобразования. Однако именно для формальных математических систем имеет место так называемая теорема К. Гёделя, утверждающая, что в рамках любой формальной системы найдутся высказывания, которые нельзя ни доказать, ни опровергнуть. Так что доказательство даже в математике не является абсолютно универсальным средством. А вот опровержение и фальсификация считаются универсальными орудиями исследователя. И выживает лишь гипотеза, выдержавшая их «удары». Известный математик Ф. Пойя как-то сказал, что «природа может ответить «да» или «нет», но она шепчет один ответ и громогласно произносит другой; ее «да» условно, ее «нет» определенно».

Если ученый и детектив одинаково относятся к опровергающим фактам — меняют гипотезу и версию, то, не обнаружив таковых, они поступают по-разному. Ученый всегда хорошо понимает, что полученная теория (неопровергнутая гипотеза) имеет ограниченное применение. Он старается очертить область ее применимости, чтобы рекомендовать ее своим коллегам использовать в тех или иных обстоятельствах, соответствующих очерченной области. С другой стороны, он хорошо понимает, что его теория может быть уточнена, то есть когда-то найдутся факты, которые потребуют ее уточнения.

У детектива таких обстоятельств нет. Его «теория», его неопровергнутая версия не должна зависеть от области применения и не имеет права на уточнение. Это должна быть истина в последней инстанции. Именно поэтому детективу приходится труднее, и, наверное, поэтому так интересно следить за ходом расследования, результатом которого должна быть абсолютная истина: «виновен» или «не виновен». (Заметим, что в науке вполне допустимы решения вида «виновен на 75 процентов», что исключено для детектива — такое дело будет ему немедленно возвращено судом для доследования.)

Конечно, действуя в таких чрезвычайно жестких рамках, следователь может ошибиться, и история криминалистики знает много таких ошибок (даже слишком мно-

го). Именно на них она учится и разрабатывает новые методы расследования, применяет новые приборы и т. д.

Любопытно, что в науке ошибочная теория далеко не всегда выбрасывается. Просто, обнаружив факты, не совместимые с теорией, эту теорию не применяют к этим фактам, область ее применения сужается. Вот и все. Примером таких «зловредных» фактов являются парадоксы теории множеств. Например, парадокс сельского брадобрея, который бреет всех, кто не бреется сам. Ответа на вопрос: «должен ли он брить самого себя или нет», теория множеств не дает. Тем не менее эта теория является, пожалуй, самой распространенной в науке и технике. И никто в ее добротности не сомневается.

Трудности детектива...

И последнее. Ученый обычно имеет дело с пассивными объектами (активные объекты мы рассмотрели выше), которые не могут активно препятствовать их исследованию. Совсем другой «объект» у следователя. Он всегда крайне активен, и цели его диаметрально противоположны целям следователя. Если реакция пассивного объекта на экспериментальное воздействие меняется лишь при изменении условий опыта, то активный объект отвечает на вопросы, учитывая последствия, которые могут при этом возникнуть. Его ответам верить попросту нельзя. Как же быть?

И именно здесь детектив обращается к методу, который не используется при исследовании пассивных объектов, методу рефлексии. В этом случае детектив ставит себя на место свидетеля или подозреваемого и с этих позиций ставит вопросы и оценивает ответы. Рефлексия при этом может быть очень сложной, типа «он думает, что я думаю, что он думает...» и т. д. В этой сложной рефлексии побеждает тот, кто владеет ею в большей мере.

...и ученого

Ученому не приходится использовать этот метод при исследовании пассивных объектов, но ему неизбежно необходимо рефлексировать при изложении полученных результатов. Здесь он должен предусмотреть ответы на все возражения его оппонентов, которые могут возникнуть при чтении статьи. Это та же фальсификация, но со сто-

роны своих коллег, и исследователь, защищая свою гипотезу, приводит убедительные аргументы в ее пользу.

Вот сказано нечто, что на первый взгляд подрывает доверие к ученому! Ведь он должен фальсифицировать свою модель, а в действительности он ее защищает. Но мы выходим за рамки психологии научного творчества и вступаем в область социальной психологии, которая значительно сложнее и тоньше, чем изложенные выше соображения о профессиональном поведении ученого и детектива. Все дело в том, что их поведение определяется не только их профессиональными целями (открыть закон или поймать преступника), но и многочисленными социальными факторами служебного, общественного, семейного и чисто личного характера, которые неизбежно влияют на профессиональную деятельность. Обычные жалобы на то, что-де текучка заедает и не оставляет времени для дела, связаны с непониманием, что через эту самую текучку и проявляются указанные социальные факторы, без которых специалист превращается в автомат, машину, решения которой, даже на первый взгляд самые правильные, будут чужды обществу, где он живет.

Именно поэтому ученый обычно не фальсифицирует свою модель, а начинает защищать, оберегать и развивать ее, часто не обращая внимания на некоторые противоречия. И такое поведение совершенно необходимо в процессе становления теории. Потом, когда она окрепнет и возмужает при практическом использовании, можно будет четко определить область эффективного применения этой теории. Любопытно, что часто эта область оказывается не той, для которой исследователь готовил свою модель. Так, например, автоматы появились сначала как забавные игрушки.

Таким образом, деятельность детектива и ученого в чем-то похожа (сбор, увязывание и интерпретация данных), а в другом (отношение к объекту и получаемой информации) отлична. В детективе для ученого привлекательно (и поучительно) всякое проявление удивительной способности по мельчайшим на первый взгляд деталям восстанавливать картину преступления, переводить «незначительное» в «существенное», по деталям воспроизводить целое. Именно эта индуктивная деятельность детектива поражает и привлекает более всего.

Следует отметить, что с легкой руки Конан Дойла, автора знаменитого Шерлока Холмса, этот процесс оши-

бочно назван дедукцией, хотя он в действительности является типично индуктивным процессом. Это автор уже писал давным-давно (в книге «Этот случайный, случайный, случайный мир», выпущенной издательством «Молодая гвардия», 1969 г.). Казалось, что этот вопрос не вызывает сомнений, так как дедукция — способ рассуждения от общего к частному — является прямой противоположностью индукции — способу рассуждений от частного к общему. Спутать их просто невозможно.

Но очарование личности Шерлока Холмса настолько сильно, что все рассуждения о его знаменитом дедуктивном методе были восприняты некритически. Эффект очарования широко используют специалисты по рекламе — таково уж свойство человеческой натуры снижать уровень критического отношения при общении с приятным



человеком — в этом есть глубокий приспособительный смысл, за который (увы!) нам часто приходится расплачиваться — иногда очень болезненно.

Именно это произошло с дедуктивным методом. Придется нам снова вернуться к этому...

Из новых записок доктора Ватсона

...Я застал моего друга в задумчивом состоянии. Он время от времени пускал в потолок дым из своей знаменитой трубки и внимательно его разглядывал. Я знал, как он не любит, чтобы прерывали его размышления, спокойно уселся за стол, сервированный заботливой рукой миссис Хадсон, и приступил к завтраку. Как я и ожидал, Холмс вскоре посмотрел на меня, улыбнулся и заговорил:

— Дорогой Ватсон, я и не представлял себе, как глубоки бывают заблуждения.

— Какие заблуждения вы имеете в виду? — спросил я, намазывая хлеб маслом.

— К сожалению, дорогой доктор, среди моих коллег, то есть криминалистов, как их нынче называют. Хотя я предпочитаю этому латинскому термину более подходящий — сыщик, потому что он более точен и близок к понятию поиска — наиболее сложной и важной процедуры, к которой сводятся все творческие процессы! Искать, искать и искать — вот девиз творчества и в искусстве, и в науке, и при раскрытии преступлений!

— Но какие именно заблуждения вас взволновали? — Мне хотелось вызвать моего друга к полемике — он мастер этого жанра, и он не заставил себя просить.

— Да все о том же моем методе, — уныло ответил Холмс. — Многие продолжают упорствовать в том, что мой метод раскрытия преступлений дедуктивный. Вы помните, Ватсон, что я понял, как ошибался, назвав его дедуктивным. Моя ошибка вполне оправданна, так как в конце XIX века плохо знали специфику индуктивных процессов. Но после первых же работ по искусственному интеллекту, где особую роль играют именно индуктивные процессы, мне стало ясно, что то, что раньше называлось дедукцией, является типичной индукцией.

— Постойте, постойте! — взмолился я. — Давайте по порядку. И лучше, если вы будете иллюстрировать свои мысли примерами. Я ведь обо всем этом не думал, как вы, и поэтому нуждаюсь в наглядном изложении ва-

ших мыслей, которые, как мне кажется, не тривиальны.

— Ну, ну, дорогой доктор, не скромничайте. А, впрочем, если вам угодно, я буду точен и последователен. Вы помните, в чем состоит дедукция и дедуктивный вывод? — спросил Холмс.

— Если верить учебникам по логике, — нарочито почтительно ответил я, — то дедукция — это рассуждения от общего к частному. Например: все рыбы плавают — это общее утверждение. Карась — рыба. Следовательно (и это заключение мы делаем дедуктивным образом), карась плавает!

— Браво, Ватсон, вы владеете дедукцией в совершенстве! Легко ли было вам сделать этот дедуктивный вывод? — ехидно спросил Холмс.

— Думаю, не труднее, чем съесть этот сандвич, — ответил я, отправляя в рот очередное произведение кулинарного искусства миссис Хадсон.

— Неужели вы такого плохого мнения обо мне, — укоризненно сказал Холмс, — что считаете моей заслугой владение этим методом?

— Но возможно, что в более сложных ситуациях такой вывод сделать трудно и для этого требуется вся сила вашего могучего интеллекта, — взмолился я. Уж очень не хотелось, чтобы знаменитый дедуктивный метод Холмса, прогремевший на весь мир, оказался столь тривиальным.

— Ничего и никогда в дедуктивном выводе принципиально не было трудным, — гремел голос Холмса, — ведь там все разжевано до предела, так как общее утверждение уже содержит свои частные случаи. Он позволяет выводить эти частные случаи. Иногда это бывает громоздко, но всегда возможно. Дедукция всегда дает на 100 процентов правильный ответ, если вы, разумеется, не ошиблись в выводе. Дедукция — это азбука логического мышления. Она содержится практически в любом мыслительном акте и, уж конечно, в размышлениях каждого сыщика. Но утверждать, что дедуктивный метод позволяет раскрывать преступления, равносильно утверждению, что хорошее пищеварение является залогом счастливой жизни. Жизнь с плохим желудком не сахар, но сколько несчастных с великолепным пищеварением!

Говоря языком математиков, дедукция является необходимым условием всякого расследования, но совершенно недостаточна для него. Нужно еще что-то. Как вы думаете, доктор?

— Индукция? — робко сказал я.

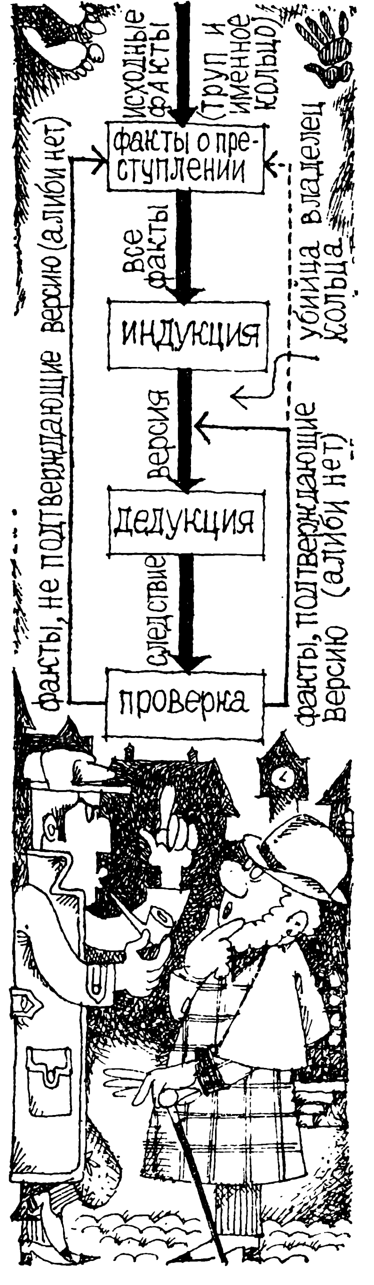
— Да, именно индукция! Но чтобы сделать индуктивный вывод, недостаточно просто логически мыслить, нужно иметь большой запас знаний и уметь ими пользоваться. Действительно, дедуктивный вывод о том, что карась плавает, нуждается лишь в исходной посылке, что все рыбы плавают и что карась рыба. Больше ничего не нужно. А теперь рассмотрим индуктивный вывод. Здесь посылкой является утверждение, что карась рыба. А из того, что он плавает, делается индуктивный вывод, что все рыбы плавают. Это очень смелое заявление. И его смелость определяется тем, что оно распространяется на всех рыб, даже тех, которые еще неизвестны науке. Но оно может быть и ошибочным, ведь возможно, что когда-нибудь и где-нибудь найдутся неплавающие рыбы. Так что о 100-процентной уверенности в правильности индуктивного утверждения нельзя говорить. Правильней всякое индуктивное заключение начинать словами «скорее всего», «почти всегда», «наверняка» и т. д., то есть оставлять лазейку для «оправдания» при ошибочном обобщении.

— Позвольте, дорогой Холмс, а зачем делать столь рискованные заключения? Может быть, можно обойтись без них? Или, если уж делать, то наверняка, многократно проверив эти заключения?

— И лишите прогресс его самого сильного рычага! Ведь только индукция дает нам возможность обобщения, без которого нет и не может быть науки, искусства и... раскрытия преступлений.

— А как же быть с возможными и, как вы утверждаете, законными ошибками индукции? — ехидно заметил я. — Ведь эдак такая ошибка может напрочь обесценить результаты, получаемые с помощью индукции!

— Дорогой мой доктор! — улыбнулся Холмс. — Не надо бояться возможной ошибки индукции, следует только предусмотреть ее возможность и принять меры по исправлению этих ошибок. Например, обнаружив рядом с трупом именной перстень, следует выдвинуть версию о том, что его владелец был убийцей (в этом состоит индукция — по одному лишь перстню воссоздавать облик возможного убийцы). Версия нуждается в проверке (на то она и версия), есть ли алиби у владельца перстня (это уже дедукция — исходя из версии убийства, выводить частный факт — наличие алиби). Проверка алиби может подтвердить версию, и тогда ее надо разрабаты-



вать дальше (выявлять знакомство с убитым, мотивы убийства и т. д. — все это делается дедуктивным образом). Но если алиби подтвердилось, то от этой версии надо отказываться и выдвигать другую — это снова делается индуктивным образом и т. д. и т. п. Вам понятно, Ватсон?

— Не очень, — смутился я. — У вас индукция сменяется дедукцией, а потом опять... Нельзя ли изобразить этот процесс как-нибудь понаглядней...

— Ничего нет проще, дорогой друг. С появлением кибернетики очень сложные информационные процессы легко представить графически. А процесс раскрытия преступления является информационным процессом — вы, надеюсь, не будете возражать против этого? Делается это так. — И Холмс изобразил схему, показанную на рисунке на стр. 105.

— Вот этот квадрат обозначает хранилище всех фактов о преступлении. Внача-

По такой схеме Холмс раскрывал преступления. Здесь индукции уделяется центральное место. Именно с ее помощью формируется версия, удовлетворяющая всем имеющимся фактам о преступлении. Дедукция же нужна лишь для проверки правильности версии, то есть справедливости следствий, вытекающих из нее.

ле туда попадают лишь исходные факты — труп и именной перстень. Все эти факты поступают на блок «Индукция». В нем (точнее, не в нем, а в мозгу сыщика) генерируется версия. Она-то и поступает на блок «Дедукция» (это, разумеется, опять мозг сыщика), в котором дедуктивно строятся следствия из этой версии. В данном случае таким следствием является необходимость выявления алиби владельца перстня. Блок «Проверка» занимается проверкой поступившего следствия — было ли оно в действительности. Если было (алиби нет), то это подтверждает версию (точнее, не противоречит ей — это очень важное обстоятельство — факты не подтверждают версию, а лишь не противоречат ей). Одновременно эти факты заносятся в блок памяти (см. пунктирную стрелку), и следует снова обратиться к блоку дедукции за новыми следствиями. Если же следствие не подтвердилось (алиби есть), то следует пополнить список фактов о преступлении и снова обратиться к индуктивному выводу новой версии (старая не выдержала испытания жизнью) — это и есть механизм исправления ошибочной индукции! Вам понятно, Ватсон? — Холмс строго взглянул на меня.

— Разумеется, — поспешно подтвердил я, — и новая версия также проходит через механизм дедукции с тем, чтобы определить ее следствия, которые надо далее проверить. Не так ли?

— Вы поняли меня лучше, чем я ожидал. Вы ведь знаете, какой я плохой рассказчик, — поспешно добавил Холмс и виновато улыбнулся.

— Теперь мне понятно, почему вас позабавила версия дедуктивности вашего метода. Ведь дедукция здесь имеет необходимое, но вспомогательное значение. Заслуга сыщика в его могучей индукции, способной выводить версии, минимально нуждающиеся в коррекции...

— ...И вовремя отказаться от версии, если она не выдерживает критики фактами, — добавил Холмс и встал. — Дорогой друг, я тороплюсь на встречу с Лейстредом в Скотленд-Ярде. Он просил помочь ему в индукции по поводу одного загадочного преступления. Я охотно помогу ему в этом. Что же касается дедукции, то он меня об этом никогда не просит. — Холмс хитро улыбнулся, не выдержал и расхохотался. — Прощайте.

Я еще раз внимательно посмотрел на рисунок — он что-то смутно напомнил мне. В моей врачебной практике ведь тоже есть версия о заболевании и проверка. Не по-

хожа ли эта схема на процесс диагностирования болезни? Действительно! (У меня перехватило дыхание.) Эта схема в точности соответствует диагностическому процессу, где вместо слова «версия» следует читать «болезнь», «вместо «следствие» — «симптом», а исходными фактами — жалобы больного. Теперь мне стало ясно, почему Холмс так гордился своей индукцией. Меня бы тоже позабавило, если бы стали хвалить за знание, какие симптомы следует проверять у больного при проверке той или иной гипотезы о заболевании. И я очень горжусь умением делать индуктивный вывод, то есть ставить диагноз, который редко бывает ошибочным. Недаром меня считают хорошим диагностом.

Закон есть закон

Случайно ли то, что доктор Ватсон в схеме Холмса, иллюстрирующей раскрытие преступления, увидел схему постановки медицинского диагноза?

Разумеется, нет! Ведь эта схема не что иное, как схема выявления закономерностей, а преступление и медицинский диагноз не более чем закономерности, связывающие имеющиеся факты: следы преступления в уголовном деле и симптомы в медицине.

Давайте рассмотрим общую схему выявления закономерности. Прежде всего что такое закономерность? И зачем ее выявлять?

Не будем приводить философское определение закономерности — философы много занимались ею... А если говорить просто, то закономерность — это то, что связывает какие-то факты, наблюдения, процессы, объекты. Всегда можно привести ряд фактов и потребовать определить закономерность, свойственную всем этим фактам. Это может быть какой-то признак или определенное соотношение признаков.

Например, какова закономерность, лежащая в основе ряда, заданного тремя числами (наблюдениями) 2, 4, 6...? Эту задачу обычно формулируют так: какое следующее число в ряду 2, 4, 6? Всякий скажет, что 8. Это и есть результат выявления закономерности в этом ряду цифр. Всегда ли это правильно? Нет! Далеко не всегда! Этот ряд может быть другим, например, таким:

2, 4, 6, 4, 2, 4, 6, 4, 2, 4, 6,...

Здесь реализуется закономерность вида «вверх-вниз».

Как же быть? Каким образом из нескольких способов продолжения числового ряда выбрать один правильный? К сожалению, никаких строгих указаний здесь не имеется, да и не может быть в принципе.

Действительно, процесс определения закономерности является индуктивным процессом (от «частных» цифр к «общему» закону их построения) и поэтому не дает и не может дать абсолютно правильного ответа, так как слишком мала исходная информация.

Но некоторые соображения по выбору одной закономерности все же высказать можно, и ими пользуются. Это критерий простоты: из двух закономерностей, описывающих исходные факты, скорее всего имеет место та, которая проще. Именно поэтому ряд 2, 4, 6 скорее всего следует продолжить восьмеркой, а не четверкой, поскольку закономерность «четные цифры» более проста, чем закономерность «вверх-вниз».

Соображения простоты — это не более чем рекомендация или, как говорят, эвристика, которая часто выполняется, но иногда может и не сработать.

Выявляем закономерность

А теперь попробуем заглянуть «на кухню» выявления закономерностей. Как мы догадались, что последовательность 2, 4, 6 следует продолжить восьмеркой, а последовательность 1, 4, 9 числом 16? Конечно, у всех свои приемы, и часто мы просто не знаем, как догадались об этом — «Просто пришло в голову. И все тут!» Такой ответ нас, естественно, не устраивает, ибо не дает рецепта «приготовления» закономерностей.

Давайте поразмышляем об этом «рецепте». Скорее всего он состоит в том, чтобы сначала решить более простую задачу — предложить закономерность на основе двух чисел 2, 4... Здесь возможны два простых варианта: считать, что следующее число образуется прибавлением двойки к предыдущему или — умножением предыдущей цифры на двойку. Так как у нас еще третье число — (6) шестерка, то можно проверить на ней эти два предположения о возможной закономерности. Легко заметить, что второе предположение не выдерживает проверки, так как $4\times2\neq6$, а первое удовлетворяет ей, поскольку $4+2=6$. Поэтому закономерность «четные числа» и является результатом выявления закономерности в ряду 2, 4, 6.

На этом примере хорошо проглядывается следующий универсальный прием выявления закономерностей — это упростить задачу, намеренно сократив перечень фактов, предложить гипотезу о закономерности для этой упрощенной задачи и проверить ее на всех оставшихся фактах. Если гипотеза подтвердится, то это и есть искомая закономерность, а если нет, то надо строить новую гипотезу и повторять ее проверку.

Это и есть столбовое направление в выявлении всякой закономерности. Алгоритм выявления закономерности можно записать в виде следующей инструкции:

1. Разбей список всех имеющихся фактов на два подсписка;

2. Предложи гипотезу закономерности для первого подсписка (это сделать проще, так как он короче исходного).

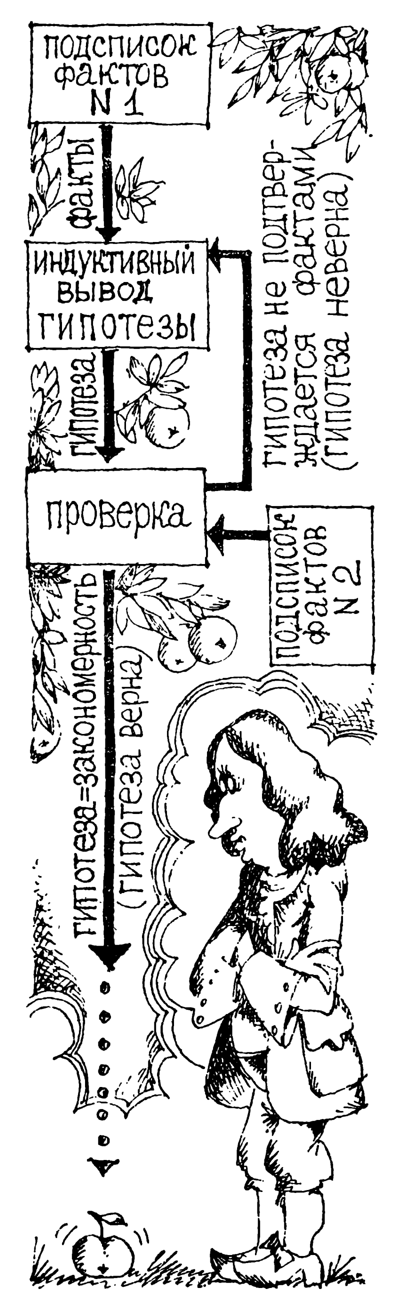
3. Проверь, выполняется ли эта гипотеза для второго подсписка фактов.

4. Если она не выполняется, то обращайся снова к п. 2, то есть предложи новую гипотезу, так как предыдущая не оправдала себя. И т. д. Если же гипотеза выполняется на втором подсписке, то это и есть искомая закономерность, так как она удовлетворяет обоим подспискам, то есть всем имеющимся фактам.

Здесь четко видны два противоположных действия. Первое — предложение закономерности (гипотезы) по укороченному списку фактов — это и есть индукция, с помощью которой строится кандидат в закономерности. Второе — проверка этого кандидата на оставшихся фактах — это дедукция. Действительно, если в первом случае мы идем от частного (укороченный список частных фактов) к общему (предполагаемой закономерности, описывающей этот укороченный список), то во втором мы идем от общего (предполагаемой закономерности) к частному (проверке, выполняется ли эта закономерность на оставшихся фактах).

Этот процесс представлен графически на рисунке на стр. 110 (он напоминает рисунок на стр. 66). Здесь возврат к индуктивному выводу повой гипотезы производится в том случае, если старая не оправдалась на втором подсписке; и обретает статус закономерности, если она удовлетворяет второму подсписку.

При осуществлении такого процесса определения закономерностей имеются...



Две трудности

Первая состоит в том, что трудно построить гипотезу, удовлетворяющую первому подсписку фактов, особенно, если он длинный. Эту трудность можно преодолеть, если первый подсписок еще раз разделить на два подсписка и генерировать гипотезу на основе первого подподсписка, а проверять на втором подподсписке, то есть применить к этапу индуктивного вывода гипотезы весь описанный процесс выявления закономерности, но для первого подсписка.

Вторая трудность значительно сложнее и состоит в том, что полученная закономерность уж очень зависит от лица, делающего индуктивный вывод (генерацию гипотезы). Действительно, мы уже говорили, что всякая индукция происходит под воздействием ассоциаций.

А это схема процесса выявления закономерностей, частным случаем которых является и раскрытие преступления, и постановка медицинского диагноза. Здесь роль дедукции выполняет процедура проверки совместимости фактов второго подсписка с имеющейся гипотезой. Если найдется хотя бы один факт, не совместимый с гипотезой, то тем хуже для гипотезы — ее надо менять. И делается это индуктивным образом при помощи первого подсписка фактов. Гипотеза становится закономерностью только в случае совместимости со всеми имеющимися фактами.

А они сугубо индивидуальны для каждого из нас. Вот и получается, что каждая гипотеза, полученная в результате индуктивного вывода, несет на себе след личности того, кто делает этот вывод, точнее — след его ассоциаций, и результат, то есть полученная в конце концов закономерность, будет зависеть от того, кто делает индуктивный вывод.

Что ж получается? Что все выявленные закономерности субъективны? Как же в этом случае познавать окружающий мир, если у каждого будут получаться свои закономерности по одному и тому же поводу?

Здесь нет причин для беспокойства; такова уж природа нашего познания — зависеть от познающего субъекта. Эта зависимость тем сильнее, чем меньше фактов лежит в основе выявляемой закономерности. Так, например, попав в другую страну и встретив чужеземку с кастрюлей на голове, вы вправе решить, что здесь кастрюли вошли в моду. И лишь то, что больше кастрюль на голове пе встречается, заставит изменить ваш поспешный индуктивный вывод о таких капризах моды. И причиной этому неправильному выводу — малое число фактов (всего один), которые легли в основу вашего вывода о новом витке моды.

Но чем больше фактов, тем меньше влияет индивидуальность познающего лица, и при очень большом числе фактов закономерность будет почти свободна от влияния личности субъекта, ее выявляющего.

Внимательный читатель наверняка захочет «прижать» автора к стенке вопросом: а какие черты личности Ньютона, Ома, Гука или Фарадея несут их законы? Неужели, если закон всемирного тяготения открыл бы не Ньютон, а какой-нибудь Смит, то этот закон Смита отличался бы от закона Ньютона?

Разумеется, нет! Тот и другой закон определяли бы силу взаимодействия двух тел пропорционально произведению их масс и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Этим и отличается закон — очень сильное свойство, которое поэтому сильно проявляется и в связи с этим легко фиксируется. Очевидно, что чем сильней проявление закона, тем раньше он открывается.

Но тем не менее первооткрыватель закона все же оставляет свой след. Он фиксируется в форме выражения этого закона, которое обычно закрепляется потомками (здесь, по-видимому, проявляется закон запечатления,

то есть важность первого впечатления от вида открытого закона). Ньютон мог бы массу в своих законах обозначать не буквой m, а другой, и мы почти наверняка бы использовали его обозначение. Так или иначе, но даже законы несут на себе хоть и формальный, но след личности его первооткрывателя.

Чем слабее закономерность, тем больше информации она несет от личности, ее открывающей, и, наконец, уникальные закономерности, связанные, например, с описанием фактов эмоционального состояния человека, вообще не имеют ничего общего и целиком и полностью зависят от их автора. Это прежде всего произведения искусства.

Однако если бы известные первооткрыватели не открыли бы свои законы, то эти законы в той или иной форме все равно были бы открыты. А вот шедевров искусства не было бы вообще, не будь их творцов. Так, не было бы соль-минорной симфонии, если бы не было Моцарта, не появлялось бы пассакалий, если бы не родился Бах, не было бы улыбки Джоконды, если бы не было Леонардо да Винчи, не было бы «Войны и мира», не будь Льва Толстого, и никто не увидел бы «Мыслителя», если бы его не вылепил Роден. Возможно, было бы что-то на них похожее, но этих шедевров не было бы. Таковы суровые законы искусства, смысл которого заключается в проявлении личности художника. Это, разумеется, не исключает отражающей роли искусства, но ценность этого отражения почти целиком зависит от личности художника. Это уже не закономерности, а уникальности.

Но вернемся к нормальным закономерностям, почти свободным от специфики ассоциаций специалиста, но тем не менее зависящим от них. Эта зависимость имеет принципиальный характер. Без них, как показано, попросту не удалось бы создать требуемые закономерности. Эти ассоциации носят досадный, но, к сожалению, необходимый характер для выявления всякой закономерности. Без них не обойтись, как не обойтись без индукции, которая опирается на ассоциации исследователя, занимающегося выявлением закономерностей.

Ассоциации сугубо индивидуальны, чрезвычайно сложны и именно потому могут считаться случайными. Здесь мы подходим к самому важному тезису нашего изложения, и сводится он к тому, что эти ассоциации вносят, по сути дела, случайность в процессы образования

закономерностей. А это приводит к случайной «зашумленности» закономерностей, которыми мы пользуемся, то есть к закономерностям, которые отличаются от реальности случайным образом.

Это и есть то главное, ради чего здесь приведены механизмы образования закономерностей. Они находятся под воздействием случайных ассоциаций, где случайность играет двоякую роль. С одной стороны, она «зашумляет» создаваемые закономерности, и это, безусловно, затрудняет их использование. Но с другой — без этой случайности не реализуется процесс индуктивного вывода. Вот и получается, что случайность здесь и вредит и помогает.

Если первая ипостась случайности в процессе выявления закономерностей довольно банальна — мало ли где случайность «зашумляет» наши представления (мы знаем, что человечество научилось бороться с этой негативной стороной случайности), то вторая ипостась — способствовать процессу индуктивного вывода — достаточно новая и нуждается в обсуждении.

Действительно, если получается, что ассоциации в процессе индукции так важны, то естественно для повышения эффективности индукции необходимо интенсифицировать эти ассоциации — сделать их многообразнее, богаче и т. д. А именно это и обеспечивает случайность.

Вот так случайность становится реальным инструментом для выявления закономерностей окружающего нас мира, инструментом познания. Это обстоятельство тем более важно, если рассматривать формализацию процесса выявления закономерностей с целью его автоматизации.

Дело в том, что существует большая практическая необходимость в автоматизации процесса выявления закономерностей. И не только потому, что человек здесь становится узким местом (особенно, когда число фактов, на которых создается закономерность, велико), но и потому, что есть много ситуаций, где человека попросту нет, а закономерности выводить надо. Речь идет о роботах, действующих в экстремальных условиях (космосе, дне океана, жерле вулкана и т. д.). Действуя самостоятельно в не определенной заранее ситуации, роботу просто необходимо строить закономерности окружающей среды — иначе он не выполнит возложенные на него функции или попросту погибнет.

Кроме того, формализация, как мы уже говорили, является столбовой дорогой науки. И поэтому стремление формализовать и тем самым передать компьютеру процесс выявления закономерностей является естественным шагом в развитии науки об автоматизации исследовательских процессов.

Итак, задача сводится к тому, чтобы реализовать индукцию без ассоциаций, то есть уметь строить закономерности, не обращаясь к очень сложному механизму человеческих ассоциаций. Как это сделать?

На помощь здесь приходит та же случайность!

Ввиду случайности ассоциаций их можно заменить неким случайным механизмом генерации гипотез. Эти гипотезы будут наверняка не слишком хорошими по сравнению с создаваемыми человеком, но зато их можно генерировать быстро и в неограниченном количестве — ведь случайность неисчерпаема в своем разнообразии. А если использовать ЭВМ, то некачественность этих гипотез можно компенсировать их большим числом с тем, чтобы случайно наткнуться на хорошую, которая и ляжет в основу искомой закономерности.

Эта идея и положена в основу использования случайности для выявления закономерностей.

Случай выявляет закономерность

Рассмотрим один из формальных методов выявления закономерностей. Формализация здесь сводится к *машинизации* индукции, то есть ее представлению в таком виде, в котором ее может выполнить вычислительная машина по заданной ей программе. Как же можно моделировать индукцию?

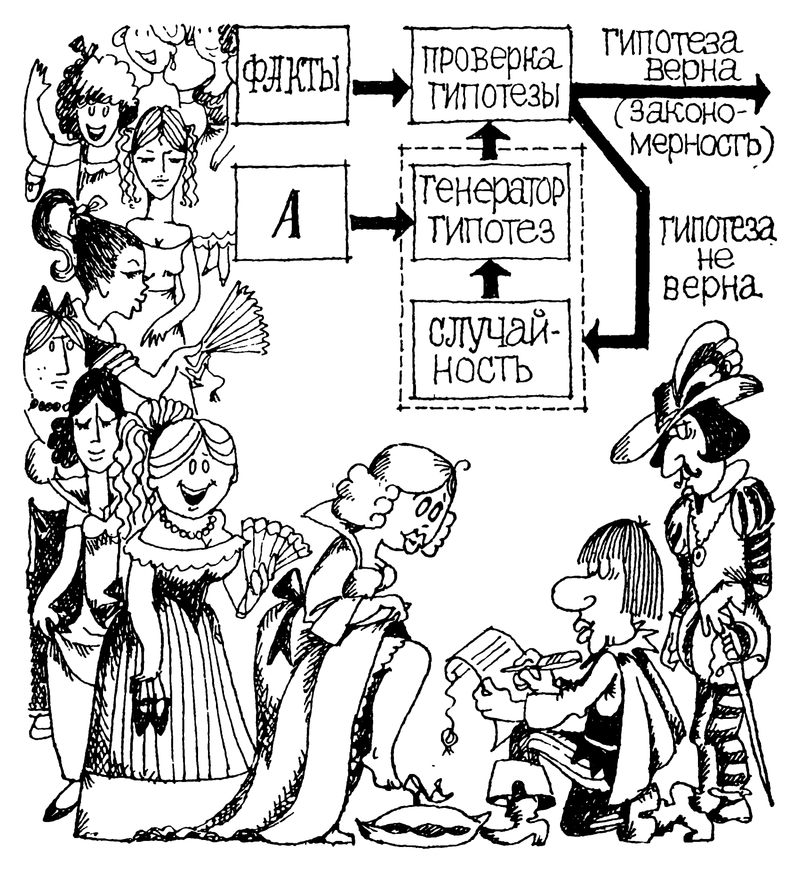
Ответ прост: индуктивный вывод должен быть случайным. Вот именно здесь и помогает случайность. Это, конечно, не гарантирует, что такой случайный вывод будет сразу удачным. Да это и не нужно. Достаточно, что предлагаемые индукцией гипотезы были бы столь разнообразны, что не совпадали бы друг с другом. А именно это можно гарантировать, поскольку случайные гипотезы совпадают разве что случайно, то есть очень редко.

Итак, генерируя случайно гипотезы о закономерностях, мы вправе рассчитывать, что рано или поздно по-

лучим то, что нужно. И на это есть вполне определенные соображения.

Действительно, перебирая случайные гипотезы, отлич-

Это схема машинной (то есть «бесчеловеческой») системы выявления закономерностей. Здесь гипотезы генерируются случайным образом, что заменяет сложный и непонятный механизм человеческих ассоциаций (вспомним, что сложность можно моделировать случайностью). «Качество» случайных гипотез будет невелико, но зато с помощью ЭВМ их можно получить и проверить очень много и рано или поздно найти то, что ищем, — гипотезу, удовлетворяющую всем имеющимся фактам. Этот процесс можно значительно убыстрить, если генерировать случайные гипотезы с учетом априорных сведений о выявляемой закономерности (блок А), то есть здравого смысла, который всегда помогает не делать грубых ошибок при генерировании случайных гипотез.



ные друг от друга, мы тем самым как бы исключаем их из дальнейшего рассмотрения. Это приводит к тому, что называют случайным перебором, с помощью которого, вообще говоря, как правило, можно найти что угодно, если это «что угодно» может быть образовано случайно. Скорее всего это произойдет поздно, чем рано, но тем не менее произойдет, и будет найдена гипотеза, удовлетворяющая всем имеющимся фактам. А именно ее мы и называем закономерностью.

Этот процесс представлен на рисунке на стр. 114, где пунктиром обведены процедуры, эквивалентные индукции. Никакой индукции здесь, разумеется, нет, так как нет никакого обобщения. Но ведет себя пунктирный блок как плохой индуктивный вывод (назовем его случайным).

Проверка же случайной гипотезы происходит по-прежнему дедуктивным образом с помощью «подстановки» фактов в поступившую гипотезу. Если хотя бы один из них не укладывается в эту гипотезу, то она немедленно отвергается и генерируется новая гипотеза. И так до тех пор, пока не найдется гипотеза, удовлетворяющая всем фактам. Она и будет искомой закономерностью.

Эта схема случайного перебора легко реализуется на вычислительной машине и может быть использована для выявления несложных закономерностей. Почему несложных?

Да потому, что перебор при этом невелик, и современный быстродействующий компьютер легко с ним справляется. Приведем пример применения этой схемы.

«Открываем» закон Ома

Всем известен закон Ома

$$J = \frac{V}{R},$$

обозначающий, что ток J (в амперах) в проводнике прямо пропорционален напряжению V (в вольтах) на его концах и обратно пропорционален сопротивлению R (в омах) этого проводника.

Давайте «откроем» этот закон по описанной схеме с использованием случайной индукции.

Сначала факты, то есть измерения тока различных проводников при различных напряжениях. Пусть имеем три проводника сопротивлением 0,5; 1 и 2 ома. Будем напряжения брать тоже на трех уровнях 0,5; 1 и 2 вольта.

А ток — какой получится. В результате получаем следующую таблицу результатов экспериментов, таблицу фактов.

Таблица

N	Факты	J	V	R
1	$Ф_1$	1	1	1
2	$Ф_2$	2	2	1
3	$Ф_3$	1	2	2
4	$Ф_4$	1	$^1/_2$	$^1/_2$

Генератор гипотез должен предлагать гипотезы в виде различных зависимостей тока (J) от напряжения (V) и сопротивления (R). Эти зависимости определяются случайно и пусть имеют, например, вид:

1. $J=V+R$;
2. $J=V\cdot R$;
3. $J=\frac{R}{V}$;
4. $J=\frac{V}{R}$.

Очевидно, первая зависимость удовлетворяет только четвертому факту: $1=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}$ и противоречит остальным. Вторая — только первому и второму: $1=1\cdot 1$; $2=2\cdot 1$ и несовместима с остальными. Третья гипотеза описывает лишь первый и третий факты: $1=\frac{1}{1}$; $1=\frac{2}{2}$; но несовместима со вторым и четвертым. И, наконец, четвертая гипотеза удовлетворяет всем четырем фактам:

$1=\frac{1}{1}$; $2=\frac{2}{1}$; $1=\frac{2}{2}$; $1=\frac{^1/_2}{^1/_2}$. Она и является законом Ома.

Легко видеть, что даже в таком простом случае процесс определения закономерности может очень затянуться, прежде чем будет найдена искомая формула (особенно, если она содержит дробные числа). Причиной этому довольно бестолковый генератор гипотез, который слишком часто выдает совсем нелепые гипотезы, напри-

мер $J = \frac{R}{V}$, то есть чем больше напряжение, тем меньше ток.

Такие грубые ошибки при генерации гипотез можно не делать, если машина будет учитывать подобного рода информацию и выдавать лишь «разумные» гипотезы. Для этого достаточно сформулировать так называемые априорные требования — требования, которые должны выполняться заранее (латинское a priori переводится как изначально).

В нашем примере такими требованиями являются: «при увеличении напряжения — ток увеличивается» и «при увеличении сопротивления проводника — ток через него уменьшается». Если эти требования учитывать при генерации гипотез, то первая и третья гипотезы попросту не рассматривались бы, поскольку они не удовлетворяют указанным априорным требованиям.

Таким образом, учет априорных требований позволяет значительно сократить случайный перебор гипотез и быстрее найти закономерность. Это очень важно для отыскания сложных закономерностей, которые без учета априорной информации о специфике закономерности не смогут быть найдены в приемлемое (обозримое) время, как бы быстро ни работал компьютер.

Все сказанное подтверждает мысль о том, что случайность в процессах выявления закономерностей играет чрезвычайно важную роль. Когда закономерность пытается определить человек, случайность выступает в виде его ассоциаций, позволяющих делать индуктивный вывод. Если же выявление закономерности поручается вычислительной машине, то здесь случайность необходима для генерирования гипотез об этой закономерности — случайных гипотез. Но и там и здесь без случайности не обойтись.

Мир, в котором вдруг исчезла бы случайность, перестал бы развиваться, в нем отсутствовал бы механизм индуктивного вывода, и, следовательно, не было бы способа выявления новых закономерностей — этого залога прогресса.

А теперь обратимся к другой важной теме — изобретательству. Каждый из нас хотя бы раз в жизни что-то изобрел, может быть, и не знает об этом. Ведь понятие изобретения очень емкое. Недаром А. С. Пушкин назвал случай богом-изобретателем. Едва ли он имел в виду только технические изобретения. Итак, покажем, как

случай является не только богом, но и вполне реальным помощником в процессе практического изобретательства самих технических объектов.

Случай в изобретательстве

Трудно найти область человеческой деятельности, где случайность использовалась бы столь интенсивно и осмысленно, как в изобретательстве. Здесь она играет основополагающую роль. Изобретатели давно это заметили и придумали много эффективных методов и способов утилизации случайности в процессе изобретательства.

Сам по себе этот процесс опирается на следующие элементарные соображения.

Представьте себе игру, например в рулетку (мы рассмотрели ее в первой главе), причем на чужие деньги, то есть при вашем проигрыше расплачиваетесь не вы, а кто-то другой, а выигрыш вы получаете сполна. Такую игру можно назвать односторонней — она, безусловно, обидна для вашего противника, и он был бы вправе отказаться от нее, если бы имел возможность это сделать. Но противником в такой игре является природа.

Пусть читатель не волнуется, мы не собираемся наносить ей какого-либо ущерба. Здесь выигрыш у нее не будет означать ее обездоливания, засорения или разрушения. Мы сохраним ее в первозданности, но лишь воспользуемся ею как партнером в игре, в которой наш выигрыш заключается в появлении изобретения, а проигрыш — отсутствии его.

Наша задача в этой игре — суметь воспользоваться случайностью, предоставляемой рулеткой или каким-либо другим случайным механизмом. Согласны вы сыграть в такую игру?

Скорее всего отказа не будет.

Итак, чтобы играть, надо знать правила игры. Они следующие:

1. Следует иметь представление, какого рода выигрыш вы ожидаете от этой игры, то есть что именно изобретаете (самолет, кофемолку или что-то еще).

2. Уметь извлекать идеи из случайности для изобретательства того, что мы хотим.

3. Ставить чаще, то есть чаще обращаться к генератору случайных идей.

4. Уметь определять момент выигрыша, то есть идею изобретения, и забирать его (этот выигрыш) немедленно.

Это последнее правило в нашей игре очень важно. Действительно, в обычной игре, где расчет происходит деньгами (или, как в рулетку, жетонами, эквивалентными деньгам), расчет происходит сразу и не зависит от того, заметили вы свой выигрыш или нет, — крупье просто пододвинет вам стопку жетонов — ваш выигрыш. Совсем иначе в нашей игре — вы легко можете «проглядеть» свой большой выигрыш. И он не повторится, так как случаен. (Точнее, повторится, но с очень малой вероятностью.) «Сорвать куш» в нашей игре, — это получить плодотворную идею изобретения, которого ждут многие. Простой выигрыш здесь — идея изобретения, которое еще надо «пробивать» и доказывать окружающим, что это изобретение. А малый выигрыш — идея, которую еще самому себе нужно доказывать, что это изобретение.

История великих открытий изобилует описаниями, как случайные события делали ценный вклад в дело прогресса, если, разумеется, исследователь умел увидеть в случайном событии свой «выигрыш» и становился поэтому первооткрывателем.

Так, Г. Герц случайно заметил крошечную искорку в одном из узлов его аппаратуры, расположенной достаточно далеко от прибора, который, как потом выяснилось, был источником электромагнитных волн. К. Рентген случайно забыл убрать со стола флюоресцирующий экран при опытах с катодно-лучевой трубкой и обнаружил, что он начал светиться. Самое примечательное здесь, что ни Г. Герц, ни К. Рентген не искали и не могли искать ни электромагнитных волн, ни рентгеновских лучей, ибо просто не знали об их существовании. И только их умение определить момент выигрыша, о котором мы говорили, дало миру эти великие открытия.

Всем, наверное, известна история открытия пенициллина А. Флемингом. В одной из чашек Петри, где разводились культуры болезнетворных бактерий, по вине ассистента из воздуха попала какая-то плесень. Это довольно обычное событие в лабораторной практике. С ним расправляются так же обычно — выбрасывают содержимое заплесневевшей чашки. А. Флеминг не сделал этого, а стал рассматривать ее под микроскопом и заметил, что около плесени бактерии не растут. Но не это было Великой Случайностью, как об этом часто говорят. Ведь до этого А. Флеминг уже знал, что носовая слизь препятствует росту бактерий, и открыл природный антибиотик — лизоцим, к сожалению, очень слабый. Так что интерес к

взаимоотношениям бактерий с другими веществами был для А. Флеминга вполне детерминированным.

Редкой случайностью здесь было то, что этот вид плесени (Penicillium notatum) оказался единственным из многих сотен видов плесени, которые вырабатывают антибиотик. Более того, специальные и очень настойчивые исследования по отысканию другой столь же сильной плесени — антибиотика пока не дали никаких результатов. Возможно, что это единственная из имеющихся в природе плесеней, обладающих таким необычным и мощным свойством (все последующие антибиотики были синтезированы искусственно).

Такая случайность поистине должна быть названа случайностью экстра-класса, что, естественно, нисколько не умаляет великой заслуги А. Флеминга перед челове-



чеством, ведь именно он сумел «сорвать куш» в своей игре с природой, и помогла ему в этом редчайшая случайность.

Роль рулетки — генератора случая — в нашей игре могут выполнять различные действия, например, пребывание в обстановке со множеством разнообразных случайных вещей. Универсальный магазин, ярмарка, даже библиотека являются теми местами, где есть такая обстановка. Особенно важно, чтобы она не имела отношения к решаемой проблеме.

Эта последняя рекомендация на первый взгляд кажется неразумной. Действительно, желая изобрести, например, велосипед с какой-то важной хитростью, естественно стремление пойти в велосипедный музей или полистать руководство по «велосипедоведению». Но именно этого делать нельзя, так как там мало случайности, а те, которые есть, уже использованы. Надо, например, идти в мюзик-холл или читать поваренную книгу. Именно там случайности обрушатся на вас и дадут возможность сделать изобретение, если вы, разумеется, сумеете воспользоваться одной из этих случайностей.

Но если бы все изобретатели в порыве творческих исканий ринулись бы на поиск случайных впечатлений, чтобы реализовать их в изобретениях, то загрузка увеселительных заведений резко возросла бы. При этом едва ли столь же возросло бы количество изобретений. Дело в том, что случайные ассоциации, столь необходимые в процессе изобретательства, можно получить более экономным и более целенаправленным путем.

Для этого разработаны многочисленные методы и методики. Их целью является сочетание случайных и целенаправленных действий, результатом которых должна быть полноценная идея изобретения.

Различие между случайно пришедшей идеей и построенной путем тщательных размышлений можно наглядно проиллюстрировать на простом примере. Попробуйте сплести цепочку или узор из канцелярских скрепок. Это нетрудно сделать. Но это задание можно поручить случаю. Возьмите коробку и положите в нее слегка раскрытые скрепки — не слишком много. Потрясите теперь коробку достаточно долго — это и есть введение случайных взаимодействий в положения скрепок. В результате вы получите довольно необычную случайную пространственную цепочку или, точнее, гирлянду из скрепок. Придумать такую гирлянду невозможно. Она случайна и поэто-

му очень оригинальна. Если ее «облагородить», то можно получить весьма необычайный и по-своему красивый узор.

Вот так же, аналогично, изобретательская мысль пользуется случайными ассоциациями, чтобы на их базе после тщательного «облагораживания» получить законченное изобретение, не только красивое, но и нужное.

Приведем пример одной из наиболее интересных методик изобретательства, называемой очень красивым сочетанием...

...гирлянды случайных ассоциаций

Только что мы получили гирлянды из скрепок, а здесь в гирлянды связываются ассоциации. Прежде всего об ассоциациях.

Это взаимосвязи предметов и явлений действительности, отраженные в сознании человека. Проявляются ассоциации в виде связи отдельных элементов сознания — ощущений, представлений и т. д. А появляются они обычно без активного восприятия, их возникновение зависит от субъективного опыта человека, его интересов и потребностей, его индивидуальных особенностей.

Виды ассоциаций разнообразны, и психологи выявили их уйму. Вот основные. Ассоциации по сходству связывают предметы по какому-то их одному признаку (сходству), например, кирпич — коробка (ассоциация по форме), кирпич — морда (ассоциация по употреблению, известна довольна грубая, но широко известная народная поговорка: «Морда кирпича просит»), кирпич — запрет (чисто шоферская ассоциация со знаком «въезд запрещен», который обычно называют кирпичом). Ассоциация по контрасту связывает предметы, имеющие противоположные признаки, например, толстый — тонкий, горячо — холодно и т. д.

Какая именно ассоциация придет вам в голову в данный момент, никто, да и вы сами, сказать не сможет, хотя определенная направленность их всегда имеется. Она связана с полом, профессией, местом жительства, кругом интересов, психическим состоянием и т. д. Есть и универсальные ассоциации. Они вызываются «сильными» словами. Так, например, слова «пожар», «катастрофа», «убийство» и т. д. вызывают у всех почти одинаковые ассоциации.

А теперь опишем методику гирлянд ассоциаций, предложенную и эффективно используемую уже много лет

известным теоретиком изобретательства Г. Бушем. Изложим ее на примере решения одной конкретной изобретательской задачи: предложить новые оригинальные и полезные идеи стульев для их производства мебельной фабрикой. Поиск идей производится в несколько этапов.

Первый этап: выписать синонимы объекта, в данном случае слова «стул» (медицинские ассоциации, разумеется, исключаются). Получаем, например, стул — кресло — табуретка — пуф — и т. д. Это первая гирлянда — гирлянда синонимов.

Второй этап: выбор случайных объектов. Это делается, например, так. Откройте любую книгу на произвольной странице и ткните пальцем в первое попавшееся слово. Это и будет случайный объект. Получаем гирлянду случайных объектов: электролампочка — карман — кольцо — цветок — пляж. Здесь, как видно, вводится случайность, столь необходимая для любого творческого процесса вообще, а для изобретательства — тем более.

Третий этап: образование комбинаций из слов этих двух гирлянд (синонимов и случайных слов). Не все слова при этом логично сочетаются, но этого не следует смущаться, так как в полученной нелогичности может скрываться интересная идея (известно, что почти все новые идеи сначала кажутся нелогичными). Таким образом, получаются сочетания: стул с электролампочкой, решетчатое кресло, стул с карманом, табуретка для цветов и т. д. Здесь есть уже известные решения: решетчатое кресло — это известное плетеное кресло, а табуретка для цветов не что иное, как подставка.

Но не это главное. Уже на этом начальном этапе появились любопытные идеи: стул с электролампочкой — это ведь сочетание стула с торшером — стоит поразмышлять. А стул с карманом можно рассматривать как стул с какими-то ящичками для предметов, нужных при работе на этом стуле. Это, несомненно, интересная идея стула производственных предприятий.

Четвертый этап: составление списка признаков для случайных объектов, выбранных на втором этапе. Цель этапа — расширение спектра случайных ассоциаций. Для этого каждому из имеющихся случайных объектов приписываются по ассоциации признаки. Например, электролампочка: стеклянная, теплоизлучающая, прозрачная, матовая, цветная и т. д.; карман: боковой, для часов и т. д.; кольцо: металлическое, пластмассовое и т. д.; пляж: песчаный, с зонтиками и т. д.

Пятый этап: генерирование идей путем поочередного присоединения к объекту изобретения (стулу и его синонимам) признаков, полученных на предыдущем. Так появляются: стеклянный стул, теплоизлучающее кресло, металлический стул, пластмассовый стул, кресло с часами, кресло с зонтиком и т. д.

Как видно, вместе с тривиальными уже реализованными решениями (металлический и пластмассовый стулья) появились совсем не тривиальные: стеклянный стул, кресло с часами или с зонтиком и т. д., что дает обильную пищу для размышлений изобретателя.

Шестой этап: генерирование гирлянды ассоциаций. Его целью является дальнейшее расширение случайных ассоциаций для изобретения. Делается это так. Каждому свойству, полученному в четвертом этапе, «навешивается» гирлянда свободных ассоциаций, связывающих два соседних слова. Например: стеклянный — волокно (ассоциация со стекловолокном) — вязание (ассоциация с волокном) — бабушка (ассоциируется с вязанием) — ревматизм (ассоциация с бабушкиными болезнями) — курорт — юг — жара — спасение — т. д. Легко видеть, что такие свободные ассоциации дают столь отдаленные связи, что диву даешься. Кроме как случайными, эти ассоциации назвать просто нельзя.

Седьмой этап: снова генерирование новых путей путем сочетания полученных на предыдущем этапе объектов с исходными (все теми же стульями и их синонимами). Так появляются: кресло из стекловолокна, кресло для лечения ревматизма, курортное кресло, спасательный стул и т. д. Здесь вместе с известными креслами (из стекловолокна и курортным, уже выпускаемыми) появились совсем необычные: для лечения ревматизма или для спасения. Что это? Очень может быть, что в этих подсказках есть глубокий смысл и предмет для изобретения.

Восьмой этап: выбор альтернатив. Он связан с решением вопроса: продолжать генерирование гирлянд ассоциаций или их уже достаточно. За все предыдущие этапы уже получено много заманчивых идей. Если их недостаточно, то простой механизм наращивания гирлянд ассоциаций дает возможность получать их неограниченно много — сотни, тысячи, десятки тысяч и более. Число приемлемых идей соответственно возрастает. На этом этапе надо решить: а не пора ли прекратить поток идей, ведь этак жемчужное зерно можно пропустить.

Девятый этап: оценка полученных идей и выбор ра-

циональных вариантов. За предыдущие этапы получено много вариантов. Среди множества нерациональных, тривиальных и попросту нелепых идей (например, кресло с кольцом) всегда найдутся оригинальные и рациональные — они составляют от 2 до 50 процентов от всех полученных. Любопытно, что количество рациональных вариантов обратно пропорционально их оригинальности, то есть чем больше рациональных вариантов, тем менее их оригинальность. Поэтому процент рациональных идей не должен превосходить 10—15 от общего их числа.

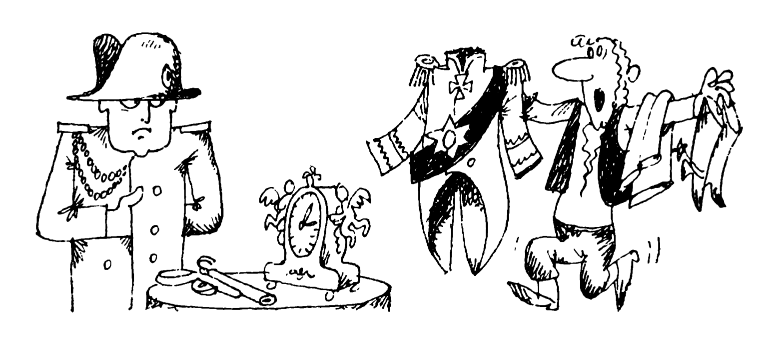
И наконец, последний десятый этап: выбор оптимальных вариантов. При этом из рациональных идей следует отобрать наилучшие — оптимальные, которые и оформляются в виде изобретения и осваиваются на производстве.

Таким образом, как показано, случайность в виде случайных ассоциаций изобретателя играет очень важную роль в отыскании новых изобретательских решений. Без них полноценных изобретений не бывает.

Но случайность в процессах изобретательства является необходимой компонентой, а отнюдь не достаточной. Кроме этого, надо иметь эрудицию, настойчивость, хорошее понимание предметной области и то, что называют изобретательской жилкой. Поэтому тому, кто вдруг захочет изобрести что-либо, совсем недостаточно получать обильные случайные впечатления. Этого мало в изобретательской игре, о которой мы говорили вначале, момент выигрыша наверняка ускользнет от него. И только зоркий глаз профессионала сможет выделить из потока случайностей ту, которая дает идею для изобретения.

Заканчивая главу о случайности в творчестве, можно констатировать, что элемент случайности во всяком творчестве играет почетную роль, не всегда осознаваемую его творцами. Попробуйте, например, писателю сказать, что он использует случайность в виде своих ассоциаций, — он наверняка обидится, так как считает, что его произведения детерминированы его личностью. А то, что эта его личность образовалась в результате «бомбардировки» случайными воздействиями среды, он, естественно, не принимает во внимание.

Не будет сильным преувеличением, если скажем, что без случайности всякое творчество довольно быстро захирело бы и превратилось в перепевы старых вариантов.



глава пятая

ЭТОТ СЛУЧАЙНЫЙ, СЛУЧАЙНЫЙ, СЛУЧАЙНЫЙ ПОИСК

Случай помогает лишь людям подготовленным.

Луи Пастер

А для чего человеку что-то искать!

Человеку свойственно стремление к оптимальности. И пожалуй, во всем. И если в чем-либо он ограничивает свои притязания, то только потому, что, кроме этого, есть другие жизненно важные цели, которые при этом не достигаются. Так или иначе, но мы всегда по собственному опыту знаем, как сильно в нас стремление к оптимальным решениям.

Наш разговор об оптимальности начнем с главного — с целей, которых человек добивается в своей повседневной деятельности и на работе, и дома.

Цели бывают разные...

И их много. Каждая из них является так называемой моделью потребного будущего. Это означает, что в целях отражаются наши потребности, которые мы желаем удовлетворить в ближайшем будущем. Потребностей много, а целей — еще больше, так как каждую потребность можно удовлетворить, добиваясь выполнения одной из нескольких целей. Например, потребность в еде можно удовлетворить различными способами: дома, в буфете, столовой, ресторане, в гостях и т. д. Соответственно цели будут различными: приготовить обед, сходить в буфет, столовую, ресторан, в гости и т. д.

Но во всем этом огромном разнообразии целей мож-

но навести некоторый порядок. Дело в том, что типов целей мало — всего три: жесткие цели, цели-ограничения и экстремальные цели. Рассмотрим каждый из этих типов.

Жесткие цели. Они порождаются строгими требованиями, предъявляемыми к окружающей среде. Так, например, цель поддерживать напряжение в сети на заданном уровне является жесткой. Говорят, что Наполеон в молодости поставил себе цель стать генералом в 30 лет или застрелиться. Это жесткая цель, и он ее выполнил. А вот цель, сформулированная в известной песенке «Как хорошо быть генералом», не является жесткой, поскольку, судя по всему, если быть генералом хорошо, то еще не значит, что не быть — плохо. Эта цель расплывчатая, выполнение которой желательно, но необязательно.

Большинство правил дорожного движения имеют характер жестких целей, которым должны подчиняться и водители и пешеходы. Многие статьи Уголовного кодекса определяют жесткие рамки нашего поведения (чего нельзя и что надо делать в той или иной ситуации). Это жесткие цели.

Как видно, жесткие цели характеризуются тем, что они обязательно должны быть выполнены. Невыполнение их грозит тяжелыми последствиями (например, аварией при несовпадении частот токов, вырабатываемых разными генераторами на электростанции, так как требование совпадения частот генераторов, работающих на одну нагрузку, является очень жестким). О нарушении Уголовного кодекса даже говорить не хочется — государственные органы (милиция, прокуратура, суд и т. д.) зорко следят за выполнением этих жестких целей и заслуженно карают за их нарушение.

Цели-ограничения. Этот тип целей имеет не столь суровый характер, как жесткие. Они лишь несколько ограничивают наше поведение и имеют вид указания, что какое-то свойство или характеристика объекта не должны превышать (или быть меньше) заданного уровня.

Например, во многих наших республиках цены на колхозном рынке ограничены сверху администрацией. Так и пишется при входе: «Максимальная цена на яблоки — ... рублей за кг», где вместо точек каждый день вписывается число, которое считается разумным. Меньше можно, и сколько угодно, хоть с приплатой. Но больше нельзя никак, иначе вмешается карающая рука администрации рынка.

Заметим, что многие жесткие цели правильней было бы формулировать как цели-ограничения. Так, например, цель Наполеона стать генералом в 30 лет, по сути, тоже не жесткая, а лишь цель-ограничение. Правильней было бы эту цель сформулировать так: не позже, чем до 30 лет, стать не меньше чем генералом или застрелиться.

И наконец, самый беспокойный тип целей...

Экстремальные цели. В этом случае показатель объекта должен приобрести экстремальное (минимальное или максимальное значение).

Если первым двум типам целей (жестким и ограничения) удовлетворять довольно просто, во всяком случае, ясно, что нужно делать, то с экстремальными целями все значительно сложнее.

Примером таких целей являются производительность технологического процесса (ее надо максимизировать), надежность создаваемой сложной системы, точность попадания проектируемой ракеты, качество производимой продукции, величина зарплаты, объем выпускаемой продукции и т. д. и т. п.

Так уж устроен человек, что к таким характеристикам у него всегда крайнее (экстремальное) отношение. Ему нужен минимум неудобств и максимум комфорта (здесь под комфортом подразумевается не мещанское благополучие, а результат удовлетворения материальных и духовных потребностей).

Так или иначе, но экстремальные цели очень близки человеку, и почти по каждому поводу он может сформулировать массу целей, начинающихся одним словом «самое» — самое прочное, самое красивое, самое дешевое, самое надежное, самое, самое, самое...

Стоит ли говорить, что эти «загребущие» цели на каждом шагу входят в противоречия друг с другом. Так, например, самый прочный автомобиль не может быть самым легким, а самая дешевая вещь наверняка не самая надежная. Как же быть?

Выход здесь один...

...Компромиссы, компромиссы, компромиссы...

Только разумное понимание, что нельзя добиться выполнения даже двух противоречивых экстремальных целей, заставляет обращаться к компромиссам. Как осуществляются компромиссы?

В жизни приходится отказываться от каких-то целей

(и считать их несущественными) ради достижения других — существенных. Очевидно, что для этого прежде всего надо их расклассифицировать на существенные и несущественные. Но у каждого свое представление о том, что считать важным, а что неважным. Поэтому компромисс — дело сугубо индивидуальное. Он зависит от того, кто формулирует цели и собирается пользоваться плодами их достижения (и, разумеется, платить за это). И вот тут-то появляется Лицо, Принимающее Решение, — ЛПР. Так называют человека или группу людей, на чью долю выпадает тяжелое бремя принятия решения: в данном случае находить компромиссы при определении важнейших целей.

Но не торопитесь очень жалеть ЛПР! Дело в том,



что все мы повседневно, даже поминутно выступаем в качестве такого лица. Действительно, на каждом шагу мы принимаем решения, которые направлены на то, чтобы выполнять наши цели. А они обычно противоречивы. Вот и приходится всем нам постоянно заниматься выработкой компромиссов, причем в одной и той же ситуации различных лиц устраивают различные компромиссы.

Дела семейные...

Не этим ли объясняются почти все внутрисемейные конфликты и особенно конфликты между разными поколениями в семье! Ситуация здесь одна, а способов образования компромиссов очень много (значительно больше, чем целей). Вот и получается, что каждый член семьи имеет свое представление, каким должен быть компромисс, основанный на его опыте, потребностях и представлениях. Очевидно, что и решения в этом случае будут разными.

Это не несчастье семьи, как иногда думают некоторые «главы», а естественное положение. И виновны в нем вовсе не члены семьи, а специфика экстремальных целей, точнее, их противоречивость, и разные представления членов семьи о том, как «учинять» компромисс. Наоборот, было бы чрезвычайно странно, если бы все члены семьи в одной и той же ситуации приняли бы одно и то же решение — такого не бывает и не должно быть! Значит ли это, что счастливых семей нет и не может быть?

Разумеется, нет. Решение еще не поступок. Перед тем как реализовать свои решения, то есть совершить поступок, каждый член хорошей семьи убеждается, что этот поступок не вызовет негативной реакции остальных. Если такая опасность имеется, то он изменяет компромисс и принимает другое решение и т. д.

Такой способ образования компромиссов (назовем его совестливым) опирается на понимание каждым членом семьи необходимости не доставлять неприятности остальным, то есть подразумевает совестливость каждого члена семьи. Например, широко распространен конфликт, связанный с желанием одних членов семьи иметь высокую степень чистоты и порядка в доме, и... нежелание других принимать участие в его поддержа-

нии. Здесь беда обусловлена всего лишь нежеланием несовестливых членов идти на компромисс, что вынуждает совестливых находить компромисс в снижении своих экстремальных требований к чистоте и порядку в доме или... покидать этот дом, что тоже является компромиссом (но какое уж это счастье!).

Именно поэтому часто используют демократический способ, суть которого сводится к голосованию всех альтернативных решений. То решение, которое набирает максимальное число голосов, называют решением семьи, и все добровольно подчиняются ему. Но при этом принятое решение обязательно для всех членов, даже если их собственные решения значительно отличались от принятого. Такой способ требует определенной сознательности всех членов семьи, что тоже не всегда бывает.

И тогда... приходится обращаться к самому старому способу, который в теории принятия решений называют диктаторским (или тоталитарным, а в народе — домостроевским). Здесь решение главы семьи является определяющим. Всякое уклонение от него недопустимо и карается.

Этот «варварский» способ принятия решений в наш демократический век кажется нелепым. Но не торопитесь осуждать его. Есть ситуации, когда он безусловно полезен (например, в критических ситуациях). Более того, он является основным в иерархических системах, где решение верхнего уровня является законом для нижнего, как, например, в армии. Таковы же отношения между родителями и детьми в молодых семьях; и это, безусловно, правильно, жаль, что эти отношения иногда сохраняются и позже, когда дети вырастают.

Как видно, способов преодоления внутрисемейных трудностей, вызванных экстремальностью целей, много. И лишь неумение воспользоваться одним из них в должное время делает некоторые семьи несчастливыми. (Здесь очень важно проявлять гибкость и в зависимости от специфики сложившейся ситуации применять тот или иной подход, используя его сильные стороны и нейтрализуя слабые.)

Но хватит о семейных неурядицах, они понадобились нам лишь как пример важности (и трудности) согласования экстремальных целей путем введения компромисса. Но другого пути нет!

Продолжим наш разговор об оптимальных решениях и способах их получения.

Решение решению рознь...

Естественно задать вопрос, что такое «оптимальное решение» и как отличить его от «неоптимального»?

Прежде всего определим, что такое «решение» вообще. В обыденной жизни под решением понимается результат выбора из некоторого множества доступных альтернатив. Так, решение бросить курить есть выбор всего из двух альтернатив: «курить» и «не курить». А решение поехать отдыхать в Ялту отвергает все другие альтернативы мест отдыха (в том числе заграницу). Общее число альтернатив здесь практически бесконечно.

Для нашего дальнейшего разговора об оптимизации решения нужно прежде всего формализовать само решение, то есть представить его в виде математических символов — чисел, букв, слов, в общем, знаков. Например, решение бросать или не бросать курить можно обозначить буквой x. Здесь альтернативы обозначим так: 1 — бросать, 0 — не бросать. Тогда $x=0$ обозначает решение продолжать курить, а $x=1$ — не курить.

Аналогично решение о выборе места отдыха будет представлять собой две величины x_1 и x_2, обозначающие, например, географическую широту и долготу точки вашего отдыха. Множество альтернатив здесь представляет собой числа — градусы долготы и широты возможных мест отдыха. Очевидно, что эти места должны быть пригодны для отдыха. Именно поэтому x_1 и x_2 не могут быть любыми числами — иначе нам пришлось бы рассматривать в качестве альтернативных вариантов болота, горные вершины, водную гладь...

И вообще, всякое решение можно представить в виде последовательности символов $x_1, x_2, x_3, \dots x_n$, то есть в впде:

$$R=(x_1,\ x_2,\ x_3,\ \dots x_n).$$

Здесь буквой R обозначено решение, а его структура представлена в виде последовательности символов x_1, x_2, x_3, $\dots x_n$, каждый пз которых может принимать определенные значения.

Например, решение «покупка в магазине» имеет структуру: x_1, — количество хлеба, x_2 — количество масла, x_3 — число пакетов молока и т. д. Каждый из этих факторов может иметь различные значения, и принять

решение означает определить эти значения. Например, решение

$$R = (200, 100, 2)$$

означает, что хлеба нужно купить 200 граммов, масла — 100 граммов и 2 пакета молока.

Хорошее это решение или плохое? Кому как! Все зависит от целей. И если цели четко сформулированы, то всегда можно найти наилучшее решение, которое обычно называют оптимальным.

Так, например, решение бросить курить является оптимальным для многих целей — минимизация расходов, максимизация здоровья (или минимизация заболеваний) и т. д.

Может ли быть оптимальным решение продолжать курить? Конечно! Оно оптимально для цели минимизации неприятных ощущений, которые бывают при необходимости избавиться от старой, пусть даже вредной, привычки. (Ведь курение не более чем привычка.) Поэтому заядлым курильщикам так «трудно» от нее отказаться: просто не хочется испытывать неудобства.

А как же начинающие? Курить начинают из-за неправильно понятых целей: «обретения независимости», самоутверждения. Вот и сжигает человечество свой труд, вложенный в табачную промышленность, и свое здоровье!

Но вернемся к более приятному примеру — покупке. Каким целям должно удовлетворять это решение? Прежде всего целям — ресурсным ограничениям. Это означает, что стоимость покупки не должна превышать той суммы, которая на нее выделена. Далее, структура покупки, то есть решение, что именно нужно покупать, определяется потребностью семьи, а количество каждого продукта — размером ее.

Теперь эффективность покупки можно определить тем, насколько она удовлетворяет цели хорошо накормить семью. А что значит «хорошо»? Для этого надо указать, сколько чего следует купить. Такое уточнение исходной цели называют ее д е к о м п о з и ц и е й. Если декомпозированную цель сформулировать жестким образом — указать точно количество каждого продукта в покупке, то хорошей будет та покупка, которая в точности соответствует указанным целям. Все другие варианты будут плохими.

Если же цели задать в другом виде, например, хлеба — не менее чем 300 граммов, а масла побольше и т.д., то хорошая (оптимальная) покупка максимизирует коли-

чество масла в рамках имеющегося денежного ресурса и при выполнении ограничений на количество молока и хлеба.

Так или иначе, но эффективность всякого решения R можно оценить обычным числом (обозначим его буквой Q), характеризующим, насколько это решение близко к наилучшему (оптимальному), при котором выполняются все поставленные цели (с учетом необходимых компромиссов, разумеется). Величину поэтому называют **целевым критерием**. Итак $R \to Q$, то есть решение R порождает величину Q, причем хорошим считается то решение, для которого величина Q минимальна.

Например, в задаче о покупке при целях: купить хлеба не меньше 300 граммов, масла и молока и затратить на это минимальные средства, критерием эффективности покупки является ее стоимость — она должна быть минимальной при соблюдении других ограничений. Оптимальным решением в этом случае является

$$R = (300, 50, 1).$$

Действительно, минимальная стоимость требует минимального количества всех продуктов, то есть хлеба 300 граммов, масла 50 граммов (меньше не взвешивают в магазине), а молока — один пакет (меньше не бывает).

В задаче о курении целевые критерии могут быть различные. Например, ежедневные затраты. Тогда решение «не курить» минимизирует эти затраты до нуля («стопроцентная экономия на основном расходе», как сказал В. Маяковский) и поэтому является оптимальным.

Здесь мы намеренно выбрали простейшие задачи принятия решений, чтобы на них показать, что для всякого принятия решения R должен быть определен спектр альтернативных возможностей (из чего выбирать) и целевой критерий Q, показывающий эффективность решения.

Итак, процедура принятия оптимального решения R заключается в выборе такого из допустимых альтернативных, для которого его показатель Q принимал бы экстремальное (минимальное или максимальное) значение из всех возможных.

Рассмотрим теперь такую важную техническую проблему, как проектирование: создание проекта конструкции, радиосхемы, агрегата и т. д. Проект — это тоже решение. Очевидно, что он должен быть наилучшим, то есть это решение должно быть оптимальным. В этом случае R — проект, а x_1, x_2, x_3, ...x_n — его параметры, его зна-

чения и величины проектируемых элементов. Например, при проектировании дома его параметрами могут быть x_1 — высота, x_2 — длина, x_3 — ширина, x_4 — тип крыши (например, односкатный или двускатный), x_5 — число окон, x_6 — число квартир, x_7 — комфортабельность квартир и т. д.

Как видно, параметры дома могут быть самыми разнообразными. Но при этом они всегда бывают трех типов — по типу шкалы измерения этих параметров. Рассмотрим эти типы шкал.

Метрическая шкала

Это старая добрая шкала, к которой давно привыкли. В ней всегда есть единица измерения (мера), такая, как метр, секунда, градус, атмосфера, вольт и т. д. Наличие единицы делает измерение очень четкой процедурой: надо «уложить» эту единицу на измеряемый фактор, а результатом измерения будет число (вообще говоря, дробное), которое показывает, сколько раз единица измерения уложилась на этом факторе. Именно так мы измеряем длину, длительность, температуру, давление, электрическое напряжение и т. д.

Четкость процедуры измерения позволяет легко ее автоматизировать. Так, например, чтобы измерить скорость движущегося транспорта, раньше «вручную» приходилось измерять секундомером время, которое проходит транспорт от одной отметки до другой. Сейчас же автомобилисты знают, что с помощью радара ГАИ точно фиксирует превышение скорости. И делает это измерительный автомат, использующий доплеровский эффект (изменение частоты сигнала, отраженного от движущегося предмета).

Метрическую шкалу часто называют шкалой отношений, подчеркивая этим, что результатом измерения здесь является отношение измеряемого параметра к единице измерения. И последнее, при метрической шкале можно делать утверждения типа «этот параметр в K раз больше (или меньше) другого», например, длина дома в два раза больше его ширины. Только метрическая шкала позволяет делать такие определенные утверждения — это сильная измерительная шкала.

В нашем примере с проектом дома в метрических шкалах измеряются линейные размеры дома, то есть параметры x_1, x_2 и x_3 (высота, длина и ширина), размеры окон и дверей, длины коммуникаций и т. д. Все эти пара-

метры измеряются в метрах. А наклон крыши — в градусах, давление в водопроводной сети — в атмосферах, температура теплоцентрали — в градусах и т. д. Все это метрические шкалы.

Есть частный случай метрической шкалы — номинальная шкала. Это ее дискретный вариант, где единицей измерения являются только «штуки». Параметр x_5 — число окон — измеряется в номинальной шкале так же, как x_6 — число квартир. Здесь результатом измерения могут быть только целые числа: 1, 2, 3,... поскольку не бывает полутора окон и полквартиры (хотя в обыденной жизни мы и пользуемся этими сомнительными понятиями).

Значительно слабее другой тип шкалы. Ее называют...

Шкала порядка

Всем хороша метрическая шкала. Но далеко не все можно в ней измерять. Например, как измерять такие важные параметры дома, как качество изготовления его отдельных элементов. Ведь говоря, что качество хорошее (плохое, удовлетворительное, отличное), мы тем самым измеряем его в баллах. Плохо, отлично — не что иное, как баллы, которые присваиваются качеству.

Можно с этими баллами связать числа, как это сделано в нашей школьной системе оценок: «очень плохо» — 1; «плохо» — 2; «удовлетворительно» — 3; «хорошо» — 4; «отлично» — 5. Но появление чисел, естественно, не вносит никаких соотношений в баллы. Так, например, четверка (вспомним школьные анекдоты на эту тему) не в два раза лучше двойки.

Беспочвенность отношения к баллам как к числам легко заметить хотя бы из того, что в других странах со школьными баллами связывают другие числа. Так, например, в ГДР принята другая числовая система оценок, обратная: «плохо» — 5; «неудовлетворительно» — 4; «удовлетворительно» — 3; «хорошо» — 2; «отлично» — 1. И немецкие школьники довольны, получив двойку, и мечтают «огрести» единицу.

С баллами связана одна распространенная ошибка — понятие «среднего балла». Действительно, осреднять в шкале порядка нельзя (это можно делать только в метрической шкале), так как в ней не существует дробных баллов. Это формальная ошибка. Ведь вместо чисел 1, 2, 3, 4, 5, обозначающих баллы, можно было бы баллы обо-

значать буквами *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, и тогда понятна бессмысленность дробных баллов, так как нет дробных букв.

Но есть и соображение по существу. Так, средний балл из трех оценок 3, 4 и 5 нельзя считать четверкой хотя бы потому, что полузнание в одной области, за которую получена тройка, никак не компенсируется отличным знанием в другой. Ведь это совершенно разные знания!

В порядковой шкале имеются только соотношения порядка. Например, «хорошо» лучше, чем «удовлетворительно» и т. д.

Обозначим школьные баллы буквами: *a* — «отлично»; *b* — «хорошо»; *c* — «удовлетворительно»; *d* — «неудовлетворительно»; *e* — «плохо». Тогда отношения между баллами можно записать с помощью знака «$>$», который, вообще говоря, читается «более предпочтительно, чем», а в данном случае «лучше, чем»:

$$a>b>c>d>e.$$

Отсюда очевидно следует, что $a>c$, $b>d$ и т. д.

Что же является измерительным прибором для порядковой шкалы?

Часто в этой роли выступает эксперт — специалист в той области, где надо измерять данный параметр. Так, в школьной системе в качестве такого эксперта выступает учитель. Именно он измеряет знания учеников в баллах оценки.

Но иногда баллы образуются усечением метрической шкалы. Таким примером порядковой шкалы измерения является шкала измерения бытовых электрических лампочек. Как известно, их мощность строго регламентирована государственным стандартом: 15, 25, 40, 60, 100, 150, 200 ватт. Эти числа не более чем названия уровней порядковой шкалы, шкалы, как видно, неравномерной.

Таким образом, порядковые (или балльные) шкалы обладают менее сильными свойствами, чем метрические, но тем не менее позволяют измерять параметры, недоступные для метрических шкал ввиду отсутствия единиц измерения.

Заметим, что любую метрическую шкалу легко перевести в порядковую, но с потерей информации.

И если внимательно рассмотреть, то всякая метрическая шкала при практическом применении оказывается порядковой шкалой. Действительно, любой метрический измерительный прибор имеет шкалу, которая размечается делениями, расстояние между которыми определяет

его точность. И с большей точностью измерять прибором нельзя. Как видно, это типичная порядковая шкала, в которой баллы определяются штрихами шкалы.

Так что порядковая шкала имеет значительно большее распространение, чем это может показаться с первого взгляда.

Самой слабой и, пожалуй, самой непривычной является...

Шкала наименований

В ней нет порядка, а есть только имена тех значений, которые принимает измеряемая величина.

Например, цвет может измеряться именами: красный, зеленый, желтый... серо-буро-малиновый. Между ними



нет никаких отношений (забудем на минутку, что цвет является электромагнитным колебанием и каждому чистому цвету соответствует своя собственная частота этих колебаний).

Людей можно измерять их фамилиями (а лучше ФИО, чтобы было меньше совпадений). Никакого порядка в фамилиях нет, разве что алфавитный.

Легковые автомобили измеряются марками, точнее, именами марок: «Жигули», «Москвич», «Запорожец». Внутри каждой марки имеются свои имена. Так, члены «семьи» «Жигулей» измеряются именами: 2101, 2102, 2106 и т. д., а измерение членов семьи «Москвичей» производится с помощью имен 401, 402, 407, 412 и т. д. Эти имена, конечно, можно проранжпровать, например, по номинальной стоимости, по объему цилиндров, по числу деталей, по величине тормозного пути и т. д. И тогда это будет шкала порядка. Но, упоминая о марке автомашины, мы лишь измеряем ее в шкале наименований.

Таким образом, параметры x_1, x_2, x_3, ...x_n, решения R могут измеряться в любой из этих шкал — метрической, порядковой (балльной) и шкале наименований. При этом всякое решение однозначно определяется конкретными значениями своих параметров. И всякому решению соответствует его эффективность, которая определяет, насколько близко это решение к выполнению поставленных целей. Эффективность решения выражается, как говорилось, одним числом Q. Чем больше (или меньше — по уговору) это число, тем больше эффективность.

Задача отыскания оптимального решения сводится, таким образом, к выбору решения, эффективность которого максимальна.

Трудность этой задачи заключается в том, что мы часто заранее не знаем, каким образом влияет тот или иной фактор на эффективность принимаемого решения, то есть неизвестно, каким же его выбирать для того, чтобы полученное решение было оптимальным.

Простые и сложные задачи

В простых задачах с принятием решений все ясно, и выбор значений его параметров не представляет труда. Например, в задаче о курении целевой критерий сразу определяет и решение. Если он экономический или ме-

дицинский, то оптимальное решение ясно: надо бросать курить.

А вот задачу оптимального распределения семейного бюджета (это тоже задача принятия решения) решить просто не удастся. Это сложная задача, в чем легко убедиться, если спросить у каждого из членов семьи, как бы он принял это ответственное решение. Наверняка двух одинаковых мнений не услышим. Мы здесь не будем предлагать способов решения семейных задач. Лучше всего их решают создатели и «потребители» этих проблем. Да и не такие задачи привели к разработке методов принятия оптимальных решений.

Это прежде всего ответственные решения, где ошибка приводит к большим затратам, низкому качеству и т. д. Как правило, в процессе принятия решений приходится удовлетворять противоречивым целям. Например, при проектировании такие важные критерии, как стоимость и надежность создаваемого изделия, вступают в конфликт, разрешать который приходится в процессе принятия решения. Стоит ли говорить, что это сложная задача, как бы просто ни было проектируемое изделие.

В повседневной жизни и в профессиональной деятельности каждому приходится принимать решения и простые и сложные. Простые нас мало волнуют, на то они и простые. А вот со сложными — хуже, если не сказать, что совсем плохо!

И именно здесь на помощь приходит случайность в виде **метода случайного поиска**, который как раз и ориентирован на получение сложных решений.

Случайный поиск неведомого

Как же используется **случайность** для принятия неведомых, но оптимальных решений?

Достаточно просто, хотя и необычно! Задача состоит в том, чтобы, изменяя каким-то образом какое-то исходное решение, получить другое решение, лучше исходного. Так как критерий эффективности решения у нас имеется, то выбрать из двух решений лучшее не представляет труда: просто надо сравнить эффективности обоих решений, и то, у которого эффективность выше, будет лучшим. Но как получать решение лучше исходного?

Именно в этом состоит проблема оптимальных решений! Действительно, умея улучшать решения, можно этим воспользоваться, чтобы получить оптимальное, то

есть самое лучшее. А для этого достаточно каждый раз улучшать предыдущее решение. В результате получится последовательность улучшающихся решений, которая будет стремиться к оптимальному, так как ей просто некуда деться!

Итак, проблема получения наилучшего решения сводится к умению улучшать предыдущее решение. Именно таким «умением» обладает случайный поиск. Рассмотрим его применительно к данной задаче.

Возьмем сначала какое-то исходное решение R_0 (например, случайное, если нет других соображений). Этому решению будет соответствовать определенная эффективность Q — скорее всего невысокая или даже совсем низкая.

А теперь в соответствии с методом случайного поиска будем искать следующее решение R_1 случайно. Для этого достаточно случайно изменить какие-то (так же случайно выбранные) параметры исходного решения R_0. Например, при проектировании электронного прибора одним из таких параметров (пусть это x_5) может быть какой-то резистор (сопротивление). Пусть в исходном решении он был равен 10 Ом. Тогда в R_1 он может быть или 9, или 11 Ом равновероятно. Это значит, что с вероятностью $^1/_2$ в R_1 выбирается $x_5=11$ Ом и с той же вероятностью $x_5=9$ Ом.

Аналогично случайно изменяются остальные случайно выбранные параметры исходного решения R_0. Как легко заметить, таких случайных решений можно без труда получить очень много, и все они будут разными. При этом одни будут хуже исходного, другие лучше. Нас интересует одно из этих лучших.

Чтобы отличить, лучше или хуже исходного полученное решение, достаточно определить его эффективность Q. Если она окажется ниже, чем у исходного R_0, то оно хуже. Что же в этом случае делать? Да просто забыть его и взять следующее случайное. Если и оно окажется хуже, то снова выбросить. И так до тех пор, пока не будет найдено решение лучше, чем исходное R_0.

Теперь мы его называем исходным и случайно изменяем с тем, чтобы получить следующее лучшее, и так далее до тех пор, пока не будет получено оптимальное решение.

Таков самый простой алгоритм случайного поиска. Он напоминает метод проб и ошибок, который применяют в тех случаях, когда неизвестно, как нужно поступать.

Именно в такую ситуацию попадает тот, кому предстоит принимать сложные решения (ведь они и отличаются тем, что неизвестно, как влияют параметры решения на его эффективность).

Описанный случайный поиск следует теперь назвать методом случайных проб и исправления допущенных ошибок. Здесь каждое случайное решение есть проба. Если она хуже исходного решения, то ее естественно назвать ошибочной и исправить на... другую случайную.

Метод проб и ошибок никогда не был в большом почете. К нему относились как к крайней и довольно примитивной мере. Такое мнение сложилось в докомпьютерную эру, когда к случайности отношение было весьма скептическое. (Эдакий скепсис по отношению к представителю низшего сословия. Да, он работает, да, без него мы ничего не можем сделать, но не упоминать же о нем в приличном обществе.)

Но с появлением компьютеров это мнение пересмотрено. И это сделано при решении задач о принятии сложных решений. Здесь случайный поиск оказался очень мощным средством отыскания оптимальных решений. Например, в области проектирования оптимальных машин, механизмов, схем, установок и т. д.

Итак, для осуществления случайного поиска следует располагать следующими тремя факторами:

1. Иметь возможность случайно изменять исходное решение в надежде на то, что полученное случайное решение окажется более эффективным, чем исходное (это и есть случайная проба).

2. Иметь возможность оценить эффективность полученного случайного решения и сравнить эту эффективность с эффективностью исходного решения. Для этого достаточно умения определять эту эффективность числом. Однако можно ограничиться возможностью просто сравнивать два решения с тем, чтобы выбрать из них одно лучшее или установить их эквивалентность. (Для этого можно, например, воспользоваться мнением эксперта — лица, компетентного в этой области.)

3. Иметь возможность возвращаться к исходному решению, если полученное оказалось хуже, чем исходное (это и есть исправление допущенной ошибки).

Вот, по сути дела, и все. Остается показать, что такое

случаиное поведение небессмысленно и приводит к положительному результату. Последнее очень важно. Дело в том, что после появления случайного поиска (а оно произошло в 1959 году, и автор был повинен в этом) были высказаны довольно резкие возражения против него, то есть против использования случайности при отыскании оптимальных решений. Такие возражения можно иногда слышать и сейчас, но они стали менее эмоциональными.

Все возражения против случайного поиска опираются на обычные предрассудки. Рассмотрим некоторые из них.

Предрассудки, предрассудки, предрассудки...

Предрассудок № 1 можно свести к простой формуле: «Что за чушь!» Именно так выражались противники случайного поиска. При этом они приводили такую «аргументацию».

Случайный поиск является не чем иным, как методом проб и ошибок (пусть даже исправляющихся). Но никогда он не считался научным. Это метод профанов и невежд, не знающих, что существуют очень тонкие и эффективные приемы получения оптимальных решений.

Все сказанное о существовании «тонких» методов правильно... лишь для крайне простых задач, то есть задач с малым числом параметров и при простой связи между решением R и его эффективностью Q. Суровая действительность ставит перед нами задачи с очень большим числом параметров и совершенно непонятной зависимостью между решением и его эффективностью. А именно на таких задачах рвутся «тонкие» методы, сколь изящны бы они ни были.

Случайный поиск является грубоватым, но может быть именно поэтому очень надежным инструментом отыскания наилучшего решения.

Предрассудок № 2 сводится к формуле: «Это просто противно». Как ни странно, но это, пожалуй, самый убедительный аргумент против случайного поиска. Действительно, можно понять человека, который при принятии ответственных решений не хочет пользоваться случайностью. Для него решение, полученное таким образом, ассоциируется с решением, полученным наугад. К сожалению, этот предрассудок очень живуч и поэтому препятствует широкому распространению случайного поиска.

Здесь уместно ответить, что решение, полученное методом случайного поиска, не является случайным. Это

оптимальное решение вполне и строго детерминированное самой задачей и не зависит от способа его получения (точнее, почти не зависит, и чем больше шагов поиска мы сделаем, тем более полученное решение не будет зависеть от способа решения задачи). Именно поэтому оно не случайно. Считать, что решение, полученное случайным поиском, случайно, так же нелепо, как думать, что пластмасса, полученная из нефти, должна пахнуть керосином или розы, удобренные навозом, должны пахнуть... не розами.

Следующий предрассудок (№ 3) связан с определенными представлениями и опытом работы со случайностью. Он сводится к такой формуле: «Случайно можно ничего и не найти».

Что ж, формула вполне безукоризненна! Действительно, действуя случайным образом, мы можем не найти оптимального решения. Может ли это произойти? Может. Но это «может» следует сопоставить с «не может», то есть определить его весомость. Оказывается, что вес «может» — невелик, а точнее, совсем мал.

Чтобы показать это, рассмотрим эксперимент с подбрасыванием монетки. Будем считать эксперимент удачным, если выпадает герб. Естественно задать вопрос: сколько раз нужно подбросить монетку, чтобы эксперимент удался?

Очевидно, что это «число раз» будет случайной величиной, которая может быть какой угодно. Строгим ответом является следующий: эксперимент будет длиться N шагов с вероятностью $1/2^N$. Это означает, что, вообще говоря, он может длиться сколь угодие долго, но вероятность такого эксперимента будет очень мала. Так, например, для случая, когда герб выпадает лишь на десятом опыте, получаем вероятность 0,001, то есть крайне малую! Это означает, что из тысячи экспериментов с подбрасыванием монетки только в одном следует ожидать, что герб выпадает лишь на десятом бросании.

Совершенно аналогичная ситуация складывается при случайном поиске оптимального решения. Возможно, что после большого числа шагов не будет найдено наилучшее решение. Но вероятность этого неприятного события крайне мала и будет тем меньше, чем больше шагов мы сделаем.

Именно поэтому на предрассудок № 3 о том, что при случайном поиске можно случайно вообще не найти наилучшее решение, является следующий ответ: да! Но с

той же вероятностью, что и выпадение много раз подряд цифры при подбрасывании монеты!

Список предрассудков вокруг случайного поиска можно было бы продолжить — автору приходилось многократно отвечать на них. Едва ли стоит продолжать его, тем более что противников случайного поиска становится все меньше и меньше. Отчасти потому, что их удается переубедить, а отчасти и в силу эффекта, подмеченного еще знаменитым физиком Л. де Бройлем. Он сказал, что часто истина торжествует не потому, что ее безоговорочно принимают, а в силу того, что постепенно вымирают ее противники. Молодежь же, не обремененная предрассудками, принимает эту многострадальную истину как само собой разумеющееся положение.

Поговорим лучше о достоинствах и возможностях, которые открывает случайный поиск. А они не малые!

Кладовые случая

Чем привлекателен случайный поиск? Прежде всего своей самой главной чертой — случайностью. Действительно, располагая ею и умело ее используя, можно разрешить много достаточно сложных проблем, возникающих в процессе принятия ответственных решений.

Всякий метод поиска решения должен давать гарантию, что оно будет найдено. Как бы трудно это ни было. Всякий не случайный метод обладает одним очень обидным свойством: для него всегда можно построить ситуацию, в которой этот метод не приводит к решению. Такую «ловушку» для регулярного метода обычно легко сделать, ибо его действия строго предопределены, и поэтому ловушка легко строится.

Например, для метода поочередного изменения параметров решения, в котором его оптимальные параметры определяются поочередно, такой ловушкой будет ситуация, требующая одновременного изменения не менее двух параметров. Так, например, принимая решение о распределении бюджета, то есть решая, какую долю своего бюджета вы потратите на питание, развлечения, одежду и т. д., нельзя изменять только одну долю, поскольку это неизбежно приведет к изменению других. Вот вам и ловушка, заложенная в самой задаче. Если вы придумаете способ обойти ее и способ будет регулярным (а не случайным), то всегда можно будет придумать другую

ситуацию-ловушку, в которую попадает ваш способ, и оптимального решения не будет найдено.

Единственным методом, для которого, в принципе, нельзя построить такой ловушки, является случайный поиск, ведь случайность «запутать» невозможно.

Это очень ценное свойство случайного поиска гарантирует ему возможность найти оптимальное решение почти в любых самых сложных и запутанных ситуациях, что всегда очень важно. Действительно, все ответственные решения всегда отличаются сложностью влияния на эффективность этого решения (иначе это решение не было бы сложным и ответственным). Вот и получается, что для отыскания сложных решений приходится обращаться к случайному поиску как к надежному средству отыскания наилучших решений.



Случай является источником всех возможностей, в том числе и требуемых. Именно это его свойство эксплуатирует случайный поиск.

Следующее немаловажное свойство случайного поиска состоит в том, что случайность почти ничего не стоит. Это означает, что за случайное изменение исходного решения не надо «платить» дорого. В детерминированных же методах каждый шаг изменения решения связан со значительными затратами по определению направления, в котором должно быть изменено решение. Для случайного поиска эти затраты практически равны нулю. (Правда, это вовсе не означает, что при случайном поиске вообще затрат нет. Они, безусловно, имеются и проявляются при оценке эффективности того или иного случайного решения, как, впрочем, и при любом другом поиске.)

И наконец, последнее и, пожалуй, самое главное свойство случайного поиска. Его эффективность с ростом сложности решаемой задачи (например, с ростом числа параметров) падает значительно медленней, чем у любого регулярного метода. Действительно, с увеличением числа параметров x_1, x_2, $x_3, \ldots x_n$ в решении R эффективность регулярного метода падает пропорционально числу новых параметров, поскольку влияние каждого нового параметра x_{n+1} x_{n+2} $x_{n+3} \ldots$ и т. д. надо исследовать, что снижает соответственно эффективность. Говоря иначе, трудоемкость решения задачи регулярным методом в лучшем случае пропорциональна числу параметров, то есть числу n.

Теория показывает, что для случайного поиска эта трудоемкость пропорциональна $\sqrt{n}$, ибо не надо изучать влияние каждого отдельного параметра на эффективность решения Q (вспомним, что при случайном поиске параметры изменяются одновременно и случайно). Именно поэтому при принятии сложных решений (с большим n) лучше применять случайный поиск. Так, например, при $n=100$ он примерно в 10 раз (так как $\sqrt{100}=10$) эффективнее регулярного поиска.

Этим и объясняется интерес, проявляемый к случайному поиску при принятии сложных и ответственных решений.

А теперь рассмотрим наиболее интересные задачи, решенные и решаемые этим методом. Это прежде всего задачи проектирования.

Проектируем...

Предположим, что нам дан заказ спроектировать электродвигатель с заданными характеристиками: весом, температурой обмотки в рабочем состоянии, КПД, мощностью и т. д.

Тогда создание проекта двигателя сводится к выбору его параметров. Легко видеть, что задача эта непроста, так как не всякая комбинация параметров позволит получить нужные характеристики.

Для решения ее необходимо построить модель, с помощью которой можно вычислять характеристики по параметрам проекта. Роль моделей может выполнять теория, если она имеется, эмпирические закономерности, основанные на прошлом опыте проектирования и изготовления аналогичного объекта, или имитации работы проектируемого объекта на ЭВМ. Во всех случаях процедура определения характеристик проекта крайне трудоемка и поэтому возлагается на ЭВМ. С помощью модели эти характеристики можно вычислить на ЭВМ для любого проекта R.

Теперь, имея значения характеристик, остается сравнить их с целевыми, то есть заданными заказчиком в проектном задании. Например, нужно, чтобы вес двигателя не превышал 10 килограммов, КПД — не менее 0,9, мощность не менее 2 киловатт, температура не свыше 80° С и т. д. Сопоставляя то, что получено, с тем, что требуется, можно вычислить степень несоответствия данного проекта заданию. Величина несоответствия и определяет эффективность Q проекта R. Чем она меньше, тем ближе проект к требуемому.

Теперь задачу проектирования можно представить как задачу выбора такого проекта R, для которого величина Q была бы минимальна. При этом характеристики проекта минимально отличаются от требуемых заказчиком.

Как нетрудно заметить, такая задача в точности совпадает с задачей о принятии решений, которую мы рассмотрели выше и для которой применили случайный поиск. Здесь только вместо слова «решение» стоит «проект», а эффективность решения заменяет эффективность проекта. Поэтому метод случайного поиска и применяется успешно в проектировании сложных машин, механизмов, схем, конструкций и тому подобных изделий новой и ответственной техники.

Случайный поиск на службе человека

Чтобы не быть голословным, следует рассказать о наиболее интересных применениях случайного поиска, когда с его помощью были получены эффективные (и эффектные) решения, реализованные в строительстве, технике, медицине, химии и т. д.

Одной из важных проблем строительства морских портов является проектирование опорных стенок, к которым пристают корабли. На эти стенки возлагается сложная функция. Во-первых, они должны сдерживать удары морских волн; во-вторых, удерживать грузы, транспорт и краны, движущиеся вдоль кромки; в-третьих, стенки не должны опрокинуться в море под давлением грунта и, наконец, в-четвертых, она должна быть недорогой. Это последнее требование немаловажно; на опорные стенки одного причала уходят сотни тысяч кубометров бетона, и делать ее излишне массивной, чтобы заведомо удовлетворить первым трем требованиям, экономически крайне невыгодно. Проектировщики уже заметили, что выбор удачной формы стенки в той ее части, которая соприкасается с грунтом, дает возможность сэкономить огромные средства. Именно поэтому при проектировании стенки старались минимизировать ее объем.

Эта задача была «поручена» случайному поиску. Число переменных, определяющих форму опорной стойки, было несколько десятков, а эффективность проекта определялась объемом бетонных работ на один погонный метр стенки (при соблюдении всех остальных требований, разумеется). Объем погонного метра стенки и минимизировался с помощью случайного поиска.

В результате расчетов были получены несколько форм стенок, среди которых оказались и уже известные, разработанные ранее проектировщиками. Но самое интересное то, что случайный поиск нашел формы стенок, ранее неизвестные проектировщикам и очень экономичные. Они и были немедленно запатентованы и применяются при создании новых портов.

Другой пример. В стране ежегодно изготовляются миллионы электродвигателей для тысяч разных целей. Двигатели проектируются так, чтобы наилучшим образом удовлетворить этим целям. Одним из важнейших требований является максимизация КПД двигателя. Подсчитано, что увеличение его всего на один процент дает ежегодно по всей стране экономию в миллионы рублей

за счет меньшего потребления электроэнергии. Поэтому так важно максимизировать КПД двигателя еще на стадии проектирования. Такая задача решалась с помощью метода случайного поиска. Ее трудность определялась большим числом параметров проекта электродвигателя и противоречивостью требований к нему (минимальность веса, габаритов и стоимости, максимальность надежности, простота обслуживания и т. д.).

Применение метода случайного поиска позволило решить еще более сложную задачу: создание не одного, а целых серий электродвигателей с разными значениями мощностей и обладающих каким-то одним заданным свойством, например, герметичностью, нечувствительностью к агрессивным средам, теплостойкостью и т. д. Такие серии заказывают различные отрасли промышленности — авиастроения, станкостроения и т. д. И если новые двигатели потребляют чуть меньше электроэнергии, то заслуга в значительной мере принадлежит случайному поиску, которым пользовались проектировщики.

Особенно широко применяется случайный поиск для проектирования изделий новой техники, работающей в экстремальных условиях, например, самолетов. Здесь проектирование сводится к отысканию тысяч параметров для того, чтобы удовлетворить сотням противоречивых требований и ограничений.

Приведем перечень некоторых областей применения случайного поиска, где принимал участие автор.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА. Проблема здесь состоит в том, чтобы построить специализированный компьютер, который решал бы определенную задачу наилучшим образом. Например, быстрее всех или надежнее. Такие задачи возникают при создании систем обработки информации, поступающей, например, из космоса (здесь требуется огромное быстродействие компьютера) или от больного, находящегося под наблюдением ЭВМ в палате интенсивной терапии (здесь требуется большая надежность ЭВМ, от чего зависит здоровье пациента).

Очевидно, что специфика процесса обработки информации должна быть отражена в схеме и конструкции подобного компьютера. При этом требования, предъявляемые к нему, всегда очень противоречивы (минимальная стоимость, максимальные быстродействие и надежность и т. д.). Проектирование таких компьютеров — дело чрезвычайно сложное. С ним успешно справляется слу-

чайный поиск, ведь для него эта задача не более чем задача о принятии оптимального решения.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА: проектирование стержневых систем (мостов, ферм и т. д.) и оболочек (контейнеров, цистерн и т. д.), обладающих заданной прочностью, жесткостью и минимальным весом. Задача проектирования конструкций осложняется грозным понятием «металлоемкость», которое требует, чтобы на изготовление больших и громоздких конструкций уходило бы как можно меньше металла. И вовсе не потому, что металл дорог, а потому, что очень дефицитен прокат из него. Поэтому так важно строить конструкции при минимальном использовании проката.

Еще более остро стоит проблема снижения веса конструкции летательных аппаратов типа самолетов. Здесь стоимость материала не является определяющей, хотя и играет, несомненно, большую роль, особенно для массовой продукции. Главное же — минимизировать вес конструкции, что решающим образом влияет на характеристики этих машин. Здесь минимизация веса дает возможность достичь максимальных скоростей, высот, ускорений. Именно случайный поиск позволяет добиваться таких экстремальных свойств на стадии проектирования как летательных аппаратов, так и строительных конструкций, которые широко используются в народном хозяйстве.

ТЕХНОЛОГИЯ. Здесь проблема заключается в создании способов разработки наилучших технологических процессов. В данном случае таким способом являются решающие правила, позволяющие по чертежу детали указать, какие этапы технологического процесса и в каком порядке должна проходить деталь. Для этого прежде всего следует «ввести» чертеж детали в компьютер. Сделать можно по-разному. Например, закодировать его последовательностью цифр, представляющих различные размеры детали. Тогда цилиндр кодируется лишь двумя числами — диаметром и высотой цилиндра. Эти два числа (и объем партии) должны быть переработаны решающим правилом так, чтобы на его «выходе» появилась рекомендация о станке, на котором наиболее целесообразно точить такой цилиндр, допустим, токарном или револьверном. Задача, следовательно, сводится к созданию таких решающих правил, чтобы полученные с их помощью технологические процессы были бы наилучшими.

В простом случае этот выбор сделать легко, скажем,

большой объем партии требует револьверного станка, как более производительного и т. д. Но в сложных случаях необходимо обращаться к специальным приемам создания решающих правил, чтобы учесть все обстоятельства того производства, для которого создается технология (состав и качество станочного оборудования, его загрузка, квалификация рабочих и многое другое). Опытный технолог, разрабатывая технологию изготовления новой детали, всегда учитывает эти обстоятельства.

А как «научить» компьютер делать это? (Напомним, что сам по себе компьютер ничего не умеет. Его «умение» образуется за счет решающих правил, которые расположены в его памяти. Поэтому, строго говоря, учат не компьютер, а решающие правила, на основе которых он работает.) Как же их обучают? Да так же, как и человека, то есть показывают образцы правильных решений, «наказывают» за ошибочно принятые решения и «поощряют» за правильные. Но здесь возникает каверзный вопрос: как поощрять или наказывать компьютер? (Что делать с учеником, мы знаем: подзатыльник и пряник всегда были символами, хотя не очень эффективных, но все-таки убедительных «аргументов» при обучении.) Для «наказания» компьютера можно использовать случайность. Делается это так: при помощи решающего правила принимается решение в какой-то конкретной ситуации, например, выбирается станок (токарный или револьверный) для обработки некоторой детали. Правило «выбирает» один из этих станков. Если решение было принято правильное (предварительно для обработки этой детали станок выбрал опытный тенхолог, чье решение является образцовым для компьютера), то не делается ничего, поскольку решающее правило справилось с этим заданием. Если же решение оказалось ошибочным, то решающее правило изменяют случайно до тех пор, пока оно не примет правильного решения, и т. д. Это, по сути дела, случайная коррекция решающего правила, моделирующего наказание при обучении. Почему случайное изменение названо наказанием?

Да потому, что после обучения людей с использованием наказания (такое обучение является скорее дрессировкой) ошибки в «наказанной» ситуации, как правило, не делаются — изменяется поведение человека. При обучении решающих правил случайное изменение правил так же изменяет его «поведение», и поэтому оно может рассматриваться как наказание. А вот поощрение

здесь проявляется в отсутствии наказания. Этот весьма суровый режим дрессировки дает хорошие результаты при обучении компьютера. После нескольких циклов такого обучения мы всегда получаем правило, решение которого совпадает с решением того технолога, который предоставил материал для обучения.

Теория и практика показали, что такой подход является чрезвычайно эффективной мерой по созданию решающих правил не только при разработке новых технологических процессов, но и в других областях.

Х И М И Я: синтез решающих правил для определения свойств химических соединений по их структурной формуле.

В химии есть очень важная практическая проблема: как по структурной формуле вещества определить его свойства? Дело в том, что химики умеют синтезировать вещества по их структурной формуле. Это очень трудоемкий процесс, требующий больших затрат средств и усидчивости многих людей. Поэтому очень важно хотя бы приблизительно знать, какие же свойства будет иметь синтезируемое вещество и стоит ли его синтезировать. Так, при синтезе лекарств очень важным свойством является биологическая активность вещества, то есть его способность воздействовать на живой организм — неважно как, пусть даже в качестве яда (ведь многие яды являются в малых дозах лекарствами, вспомним о змеиных ядах — ценнейших источниках лекарственных препаратов).

Чтобы определить, какое свойство будет иметь вещество с заданной структурной формулой, надо построить решающее правило, с помощью которого структурную формулу вещества можно преобразовать в свойство этого вещества. Получение таких решающих правил и осуществляется с помощью случайного поиска аналогично тому, как синтезируются правила при выборе технологии. Для этого нужно иметь так называемую обучающую последовательность. Это набор веществ, для которых все известно — и структурные формулы, и их свойства. Именно с помощью этой последовательности обучается решающее правило. Делается это так.

В него вводится структурная формула вещества, свойства которого известны. Для этого структура кодируется набором чисел, которые и обрабатываются решающим правилом. Если правило верно указало свойства вещества (а они заранее известны), то переходят к следующему

соединению из обучающей последовательности. Если же правило ошиблось, то его «наказывают» случайным изменением, то есть изменяют случайно преобразование кода структуры в код свойства вещества. И делается это до тех пор, пока правило не «выскажется» правильно, после чего переходят к следующему соединению из обучающей последовательности. Обучение заканчивается, если для всех веществ обучающей последовательности правило верно предсказывает их свойства. Означает ли это, что полученное правило для всех других веществ точно предскажет их свойства?

Разумеется, нет, но ошибок будет немного. Это и даст возможность приближенно предсказывать свойства соединений по их структурной формуле.

Читателя, возможно, разочарует приближенность такого подхода. Но без него процент нужных соединений среди синтезированных был крайне низок — в основном у химиков получались не те вещества, которые они искали. Так, например, в фармакологической промышленности лишь 10 процентов новых веществ обладали необходимой биологической активностью. А при использовании описанного подхода процент выхода повысился до 50—80, то есть эффективность работы химиков возросла в 5—8 раз! Это очень много. И значительная заслуга в этом принадлежит случайному поиску.

М Е Д И Ц И Н А: разработка диагностических правил, позволяющих эффективно распознавать болезни; создание модели больного для выработки эффективного метода лечения, например, для автоматизации введения инсулина больным сахарным диабетом. Компьютерная диагностика производится с помощью все тех же решающих правил, которые здесь называют д и а г н о с т и ч е с к и м и. Они обрабатывают данные о симптоматике больного и определяют его заболевание. Обучение диагностических правил происходит на обучающей последовательности случаев заболеваний, где диагноз был известен точно. (Такие случаи в медицине называют верифицированными, то есть достоверно проверенными.) Обучение диагностического правила производится методом случайного поиска точно так же, как это было описано выше. Такие обученные правила хорошо диагностируют больных.

При многих заболеваниях необходимо точно дозировать лекарства в зависимости от состояния и индивидуальных особенностей больного. Таково, например, лечение сахарного диабета, при котором доза инсулина стро-

го дозируется не только состоянием больного, но и тем, как оно изменится в ближайшее время. Для этого нужна модель больного, с помощью которой важно определить, каким будет его состояние в тех или иных обстоятельствах и как он будет реагировать на ту или иную дозу инсулина или сахара. Модель представляет собой систему уравнений, которую решает компьютер. Эту систему также обучают на материале наблюдений за данным больным так, чтобы модель «реагировала» так же, как и больной. Обучение производится методом случайного поиска так, как это описано выше.

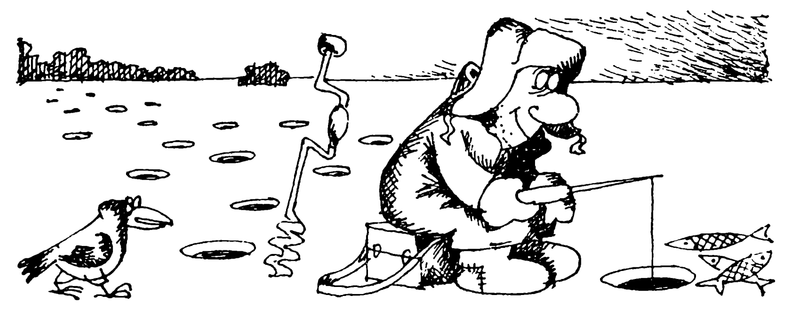
КРИМИНАЛИСТИКА: создание способов сопоставления двух изображений.

Очень часто в криминалистической практике возникает следующая задача. Как определить по двум фотографиям, одно и то же или разные лица изображены на них? Трудность здесь состоит в том, что фотографии сделаны с разных ракурсов, в разное время, разными фотоаппаратами и т. д. Можно ли ответить на этот вопрос строго? (Раньше на него отвечал эксперт, и его «похож» и «не похож» были решающими. Но кто должен быть экспертом?)

Оказывается, можно. Дело в том, что на лице человека есть так называемые константные точки, положение которых мало изменяется во времени. Это кончики век, уголки губ, виски, переносица и т. д. Проставив эти точки на обеих фотографиях, мы получим некую пространственную форму, определяемую точками. Теперь задача сведется к сравнению двух геометрических форм, сфотографированных в разных ракурсах и разных масштабах. Это осуществляется путем вычисления величины близости обоих изображений. Но эта величина зависит от неизвестных ракурсов, масштабов и других искажающих факторов. Именно их значения нужно найти, чтобы сопоставить изображения. Случайный поиск справляется с этой задачей и позволяет определить величину «неувязки» изображений, то есть насколько они не соответствуют друг другу. Если она мала, то на фотографиях изображено одно и то же лицо. И разные, если велика.

Этот перечень областей, где случайный поиск нашел свое применение, можно было бы продолжить.

Опыт автора и его коллег убедительно показал, что случайный поиск интенсивно и плодотворно внедряется в самые разнообразные области человеческой деятельности. И эти внедрения развиваются лавинообразно.



глава шестая.

СЛУЧАЙ С АДАПТАЦИЕЙ

Никогда не пренебрегайте особым, удивительным случаем...

А. Флеминг

Конвейер и настроение

Нет, это не завлекательная уловка автора — соединить в одном предложении столь различные на первый взгляд понятия, как конвейер и настроение работающих на нем. Речь пойдет о решении одной из важнейших задач массового производства — какую выбрать скорость конвейера. Очевидно, что она должна быть не слишком медленной, когда просто мало готовой продукции будет поступать на выход конвейера. Скорость не должна быть также слишком быстрой, когда сильно падает качество продукции из-за того, что рабочие не могут качественно выполнять свою работу и на выходе конвейера пойдет много брака. Это тоже плохо. Скорость конвейера должна быть какой-то средней, промежуточной, когда оба упомянутых негативных фактора действуют слабо — и скорость достаточно велика, и рабочие делают мало ошибок. Но что значит «велика» и «мала»?

Чтобы решать эту задачу, ее надо формализовать — надо построить модель и прежде всего численно определить эффективность конвейера с тем, чтобы выявить ее зависимость от скорости.

Если критерием эффективности конвейера выбрать его производительность, то есть объем качественной готовой продукции (а именно она волнует всех), то зависимость этого объема от скорости конвейера (при прочих равных условиях) будет иметь вид, показанный на

верхнем рисунке на стр. 159. Хорошо видно, что существует максимум Q производительности конвейера. Ему соответствует скорость x_1 конвейера, которую и называют оптимальной, наилучшей. Действительно, лучше скорости быть не может, ибо при ее изменении в сторону уменьшения или увеличения число хороших деталей на выходе конвейера уменьшается (при прочих равных условиях, однако).

Вот уже дважды мы произнесли как заклинание таинственные слова «при прочих равных условиях». А ведь это действительно заклинание, ведь никогда при работе конвейера с людьми никаких «прочих равных условий» соблюсти нельзя! И причиной является... настроение рабочих, точнее, не настроение, а способность точно выполнять порученные операции, которая очень зависит от настроения. Человек не робот. И это очень хорошо, ведь ему можно поручить работу, с которой не справится ни один робот нашего времени, ближайшего и далекого будущего. Но за универсальность он платит зависимостью качества работы от настроения (как знать, может быть, универсальным роботам далекого будущего предстоит та же «плата»? Ведь за все надо платить!).

Вот и получается, что производительность Q конвейера зависит не только от скорости x_1, но и от настроения рабочих (обозначим фактор настроения буквой x_2). Чтобы построить модель, необходимую для учета настроения, следует его изменить. Но как? И в каких единицах? Таких единиц не существует! Психологи, наверное, умеют как-то измерять настроение, но наверняка это сложная и громоздкая процедура. Нельзя же просто спросить у рабочего о его настроении. Ответ скорее всего будет не тот, который вы ждете, а который нужен рабочему, и это его право.

Для простоты будем считать, что настроение можно измерять в трехбалльной шкале: a — плохое; b — нормальное; c — хорошее. (Легко заметить, что здесь мы измеряем настроение в порядковой шкале: очевидно, что $a<b<c$). Теперь зависимость производительности конвейера от скорости и настроения можно представить в виде трех кривых, показанных на нижнем рисунке на стр. 159. Это и есть интересующая нас модель работы конвейера, учитывающая два важных фактора — скорость x_1 и настроение работающего на нем x_2.

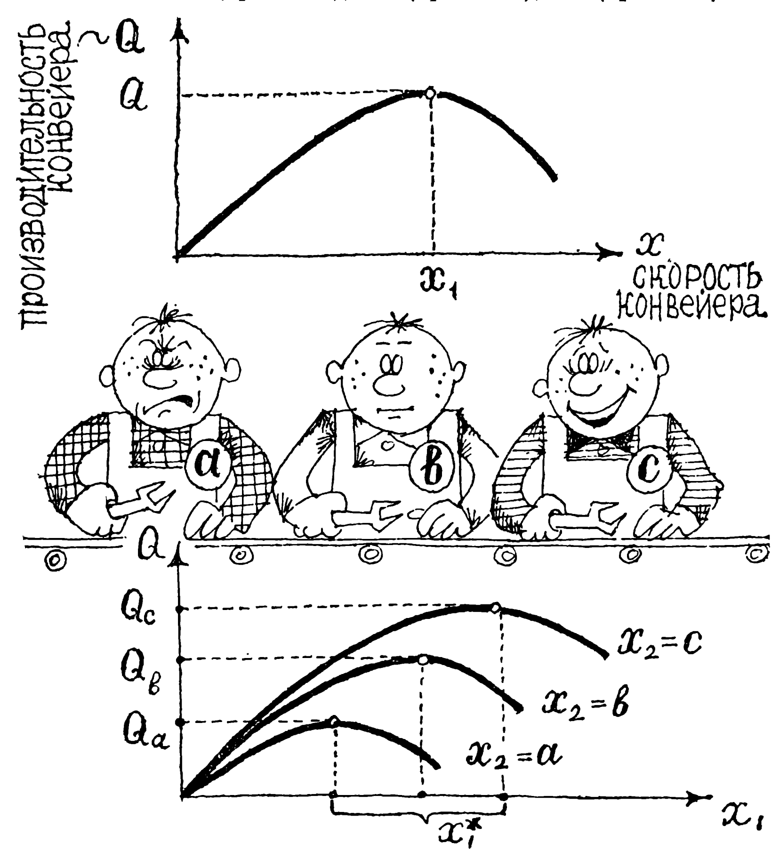
Эту модель использовать очень просто. Надо лишь (!) измерить значение фактора x_2 — выяснить, чему он ра-

вен: *a*, *b* или *c*. Затем по соответствующему графику на рисунке определить оптимальную скорость конвейера x_1, соответствующую одной из точек 1, 2 или 3. Вот и все!

Как видно, дело лишь за измерением настроения. Но именно это сделать очень и очень трудно. Проще отказаться от него и принимать решение без учета такого

Так зависит число качественных деталей на выходе конвейера (именно оно характеризует производительность) от скорости конвейера при «прочих равных условиях».

А здесь уже учтен второй фактор — фактор настроения x_2, который имеет три уровня *a*, *в* и *c*. Хорошо видно, как важно знать уровень настроения для выбора скорости конвейера. Только в этом случае могут быть достигнуты максимальные производительности Qa (при $x_2=a$), $Qв$ (при $x_2=в$), Qc (при $x_2=c$).



важного фактора, как настроение, и поступать каким-то другим образом. Но каким?

Здесь на помощь приходит адаптация. Надо, чтобы скорость конвейера приспосабливалась, адаптировалась к состоянию рабочего. Сделать это довольно просто. Достаточно строго следить за производительностью конвейера и изменять его скорость. Пусть, например, скорость увеличилась. Если такое увеличение привело к уменьшению производительности, то надо вернуться к прежней скорости, а потом ее еще уменьшить и последить за производительностью конвейера. Так, постепенно пробуя ту или иную скорость, можно выйти на оптимальную, которая дает максимальную производительность на данный период.

Здесь следует отметить два важных обстоятельства. Первое: адаптацией приходится заниматься лишь при отсутствии необходимой информации, в данном случае информации о настроении рабочих. Если она имеется, никакой адаптации не нужно. Достаточно просто перевести объект в оптимальное состояние, и все!

Второе: всякая адаптация происходит методом проб и... возможных ошибок. Действительно, в нашем примере из-за отсутствия необходимой информации не знаем, в какую сторону изменять скорость конвейера — увеличивать или уменьшать ее. Именно поэтому необходимы пробы. А возможное временное ухудшение работы конвейера, то есть частичное снижение его производительности, является своеобразной «платой» за адаптацию. Именно поэтому выход на оптимальный режим работы конвейера методом его адаптации всегда связан с пробами, с помощью которых и добывается та самая информация, которая необходима для его настройки.

Здесь и можно использовать случайность. Действительно, всякая проба делается для того, чтобы получить информацию (на то она и проба). При этом все равно, в каком направлении изменяется скорость. Поэтому для выбора направления пробного шага можно воспользоваться случаем, скажем, монеткой.

Но такая случайность не очень интересна. Она произошла оттого, что оба направления пробы равноправны, и мы воспользовались монеткой, чтобы не оказаться в положении буриданова осла.

Напомним, что притча о буридановом осле произошла именно из-за неумения использовать монетку в затруднительных ситуациях. Дело в том, что ослу пришлось вы-

бирать между двумя охапками сена, которые были расположены на одинаковых расстояниях справа и слева от него. Средневековый монах — схоласт Буридан, придумавший такую ситуацию, утверждал, что осел скорее умрет с голоду, чем сумеет принять решение, с какой из охапок сена начать есть. Случайность и помогает нам не оказаться в положении такого буриданова осла при адаптации.

Но значительно важнее применение случайности, когда приходится изменять не один параметр объема адаптации, а несколько (например, при необходимости не только подбирать скорость конвейера, но и освещенность рабочих мест, вид работ и приспособлений и т. д.). Здесь, как и при оптимизации (см. главу V), случайность просто спасает от излишних затрат.

Беспомощность компьютера

С недавнего времени изобретения электронных вычислительных машин, которые взяли на свои железные плечи заботу о переработке информации, человечество крепко задумалось над довольно каверзным вопросом. Почему эти компьютеры, которые могут делать вычисления в миллиарды раз быстрее человека, иногда в простейших ситуациях проявляют удивительную тупость? Сначала такие ситуации и задачи было решено назвать творческими, то есть доступными только человеку. Так попытались разграничить сферу машинной и человеческой компетентности. Но потом оказалось, что большинство из этих задач как-то неудобно называть не только творческими, а и просто задачами.

Например, животные без труда отличают себе подобных. Для машины такая задача пока непосильна. Животные и растения легко приспосабливаются к новой обстановке, а вот чтобы машина сама приспособилась к задачам, которые ей приходится решать, и сама отыскивала способы их решения — такого еще не было. Ее обязательно нужно снабдить точной инструкцией (программой) решения новой задачи, даже если она очень похожа на ту, которая ею только что решалась.

Вот и получается, что задача приспособления (адаптации) к новым условиям существования, столь просто и естественно решаемая в живой природе, вырастает в сложную проблему адаптации технических систем вообще и компьютера в частности.

Трудность технической адаптации состоит в том, что заранее обычно неизвестно, что именно нужно изменять в адаптируемой системе, чтобы она приспособилась к новым условиям. Если это известно, то задачи не было бы — была бы задача компенсации, которая значительно проще. Например, включая нагреватель, мы тем самым компенсируем недостаток тепла. Здесь никакой адаптации нет — состояние объекта (пониженная температура в комнате) однозначно определяет нашу реакцию — включение нагревателя. Но для компенсации нужно иметь всю многочисленную необходимую информацию, что требует значительных знаний об объекте и его среде. А именно этих знаний и недостает в практических задачах. Вот и получается, что хотелось бы использовать компенсацию, но отсутствие необходимых данных заставляет обращаться к адаптации, которая не требует их.

Суть задачи адаптации легко уловить на таком простом примере, с которым наверняка встречался каждый. Речь пойдет о настройке радиоприемника на «плавающую» станцию. Такая станция «уплывает» в случайном направлении, и, чтобы ее слушать, необходимо время от времени подстраивать радиоприемник с помощью ручки настройки. Это и есть адаптация приемника к изменяющимся условиям его эксплуатации, к «уплыванию» станции.

Здесь роль адаптирующего устройства выполняет сам радиослушатель, а изменение ситуации вызвано изменением состояния радиоканала, связывающего радиостанцию с вашим приемником. Высококачественные приемники имеют специальный блок слежения за уплывающей радиостанцией. Такой блок и реализует адаптацию.

Читатель здесь, возможно, разочарованно скажет: «Ну какая же это трудность, если ее удается преодолеть с помощью электронного блока, пусть даже очень сложного?»

Действительно, здесь трудности большой нет — приемник настраивается на станцию легко. А вот представьте себе, что приходится подстраивать его не одной, а сотней ручек! Именно такую задачу приходится решать при адаптации технологического процесса.

Да что там сто — достаточно двух ручек настройки, чтобы поставить вас в трудное положение. Действительно, следует помнить, что только одно определенное положение ручек обеспечивает настройку прибора и это положение изменяется непредвиденным образом. Такая за-

дача не в два раза труднее, чем настройка одной ручкой, а во много раз больше! И именно такую задачу приходится решать в процессе адаптации реальных технических систем — технологических, информационных, вычислительных и многих других.

Задача адаптации, таким образом, возникает всегда, когда изменяются условия существования объекта, что приводит к снижению его эффективности, которую надо поддерживать на максимальном уровне.

Итак, необходимость и возможность адаптации определяются четырьмя факторами:

1. Изменением объекта или его среды, требующим адаптации объекта (это дестабилизирующие факторы, снижающие эффективность объекта);

2. Наличием критерия эффективности функционирования объекта (он должен определяться количественно, то есть числом);

3. Возможностью воздействия на объект, с помощью чего и реализуется адаптация (должны существовать изменяемые факторы объекта);

4. Наличием правила адаптации — ее алгоритма.

Если первые три фактора очевидны, то четвертый (алгоритм адаптации) нуждается в пояснении, тем более что именно здесь проявляется оборотная сторона медали адаптации — ее трудности, которыми приходится платить за ее достоинство.

За все надо платить — за адаптацию тоже

Вернемся к примеру с настройкой радиоприемника. Чем платит слушатель за настройку приемника?

Немногим. Он должен крутить ручку настройки вправо-влево до максимальной слышимости интересующей его станции. Это самое «вправо-влево» и есть поиск, цель которого — максимизация слышимости (а не громкости — ею управляет рукоятка уровня звука).

Если рукоятка адаптации одна, то реализовать процедуру «вправо-влево» не представляет труда, но если их n штук, то различных вариантов — «вправо-влево» будет 2^n, например, для $n=10$ более тысячи! (Точнее, 1024!) Именно это обстоятельство заставляет задуматься о величине платы за адаптацию. Ведь если надо найти лишь один из тысяч вариантов, то в такой ситуации, кроме перебора всех вариантов, придумать ничего нельзя. Или при большой удаче мы наткнемся на него сразу,

или, при неудаче, затратим более чем тысячу проб. А в среднем придется 500 раз пробовать, прежде чем удастся настроить объект адаптации.

Как видно, за адаптацию приходится довольно дорого платить и тем больше, чем больше число рукояток адаптации. Именно с такими задачами имеет дело оператор сложной системы — ему приходится поддерживать ее и в оптимальном состоянии, несмотря на действие всякого рода посторонних факторов, которые выводят ее из оптимального состояния. Заметим, что оптимальное состояние объекта отличается тем, что любое воздействие на него приводит к отклонению его от оптимума. Это ценное, но, увы, весьма хрупкое состояние, которое очень легко разрушить. Адаптация и предназначена для того, чтобы поддерживать объект в этом желаемом оптимальном состоянии.

Как легко заметить, всякое случайное воздействие на объект выведет его из оптимального состояния. Именно поэтому так страшатся всякого рода случайностей операторы сложных объектов. Но именно случайность может помочь при их адаптации.

Это делается с помощью алгоритмов случайного поиска (напомним, что под алгоритмом подразумевается точное правило, инструкция, указание, как следует действовать в той или иной обстановке).

Алгоритмы случайного поиска

Их много, и отличаются они, пожалуй, единственным — использованием случайного шага — шага в случайно выбранном направлении. В предыдущей главе мы убедились в целесообразности введения случайного шага. Но если там он делался в процессе улучшения решения, то есть на стадии его подготовки, а не реализации, то теперь он должен быть сделан на реальном объекте — машине, процессе, установке. Психологически это очень непросто — случайно изменять параметры адаптируемого объекта. Поэтому можно понять инженеров, которым случайный поиск сначала показался... не слишком убедительным методом адаптации реальных процессов. Тем не менее он пробил себе дорогу и здесь, ибо оказался очень эффективным.

Рассмотрим некоторые наиболее распространенные алгоритмы случайного поиска, используемые при адаптации.



Случайный поиск с линейной тактикой

Так называют алгоритм случайного поиска, моделирующий поведение живых организмов. Что характерно для их поведения? Прежде всего повторение удачных шагов. В этом и состоит линейность тактики поведения — повторять удачные шаги. Если шаг (неважно, как он был сделан) привел к успеху, был удачным, то животное всегда постарается повторить его — таково приспособительное свойство живых организмов, выработанное за миллионы лет эволюции. Именно это свойство поведения обеспечило преимущество и, следовательно, выживание всех ныне здравствующих видов. Итак, как себя вести в случае удачи, ясно: повторять то действие, которое привело к удаче. А как вести себя при неудаче? Здесь в ответе на этот коварный вопрос и проявилась вся мудрость природы — надо действовать слу-

Это граф алгоритма случайного поиска с линейной тактикой. (Под графом понимают вершины, здесь их две, связанные стрелками — условными переходами с одной вершины на другую. Рядом со стрелками приведены условия этих переходов.) Действуя в соответствии с этим алгоритмом, можно быть уверенным, что объект будет адаптироваться, и произойдет это за счет повторения удачных шагов и введения случайности при неудаче.

чайно! Да, да, только случайно! Чем хороша здесь случайность?

Прежде всего тем, что она содержит все возможности — в том числе и хорошие, которые приводят к удаче (и последующему повторению удачного поведения).

Таким образом алгоритм случайного поиска с линейной тактикой имеет лишь два действия: делать случайный шаг и повторять шаг, оказавшийся удачным. Обозначим их соответственно значками «ξ» и «$+$».

Задать алгоритм — значит, кроме его действий, задать правила перехода от одного действия к другому, то есть как следует поступать в той или иной ситуации — при удаче и неудаче. Правила перехода для алгоритма линейной тактики задаются следующим естественным образом: при неудаче следует делать случайный шаг (обращаться к действию ξ), а при удаче повторять предыдущий шаг (обращаться к повторению «$+$»). В результате получаем граф алгоритма случайного поиска с линейной тактикой. Он показан на рисунке на стр. 165.

Здесь кружками обозначены эти два действия алгоритма, а стрелками — условные переходы. Каждый переход осуществляется при определенных условиях. (Отсюда и название — условный переход.) Здесь таких условий два: удача и неудача того действия, которое только что совершилось. Поэтому рядом со стрелками условных переходов обозначено условие, при котором следует воспользоваться стрелкой.

Теперь необходимо определить, что называть удачей и что неудачей при адаптации. Ответ будет простой: удачно то, что приближает к цели адаптации, а неудачно то, что отдаляет от нее. Если, например, в процессе адаптации можем оценивать эффективность объекта величиной Q, то ее увеличение и будет, очевидно, означать удачу, а уменьшение, или, точнее, неувеличение, — неудачу.

Несомненным достоинством алгоритма является то, что, случайно найдя хорошее направление, он использует его до конца — в этом направлении будет сделано столько шагов, сколько можно, ведь каждый шаг в удачном направлении удачен.

Заметим, что применять алгоритм можно только в том случае, когда есть смысл в словах «повторить предыдущий шаг». Далеко не всегда он имеет место. Действитель-

но, в случае, когда адаптируемые параметры объекта измеряются в шкале наименований, то такое понятие теряет смысл. Например, имеется тип транзистора, а шаг заключается в переходе от транзистора одного типа к транзистору другого типа. Как повторить шаг при удаче? Это не имеет смысла. Поэтому алгоритм применим только для объектов, адаптируемые параметры которых измеряются в метрических и порядковых шкалах.

Рассмотрим в качестве конкретного примера применение этого алгоритма при решении задачи балансировки ротора — вращающегося вала. Такие роторы имеют все электрические двигатели, генераторы, турбины и многие другие машины современной техники. Отличительной их особенностью является работа в крайне напряженных условиях: высоких оборотах, больших температурах, повышенных силовых нагрузках и т. д. Такие условия приводят к тому, что ротор теряет балансировку — его центр тяжести смещается с оси вращения, что вызывает неизбежные его вибрации. Они могут быть настолько велики, что иногда приводят к разрушению или самого ротора, или здания, в котором он установлен. Эта проблема особенно остра для тяжелых и сверхтяжелых роторов газовых турбин. Как же предотвратить возникающие вибрации?

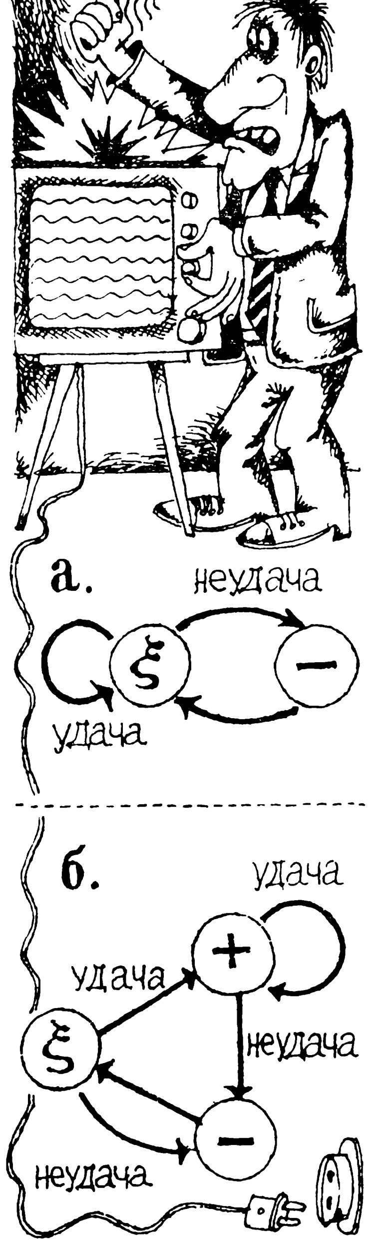
Надо вернуть центр тяжести ротора на ось его вращения. На роторе устанавливаются подвижные грузы, приводимые в движение небольшими электродвигателями. Грузы, двигаясь, могут вернуть центр тяжести ротора на место, если их расположить определенным образом. Но для этого надо точно знать, в каком направлении и на сколько сместился центр тяжести. Именно такой информации нет. Поэтому задачу решают методом случайного поиска с линейной тактикой следующим образом.

Грузы начинают двигать в случайных направлениях. Если при этом вибрации возросли, что легко фиксируется вибродатчиками, то такой шаг признается неудачным и направление движения грузов изменяется. И так до тех пор, пока вибрации не начнут уменьшаться. В этом случае движение грузов не изменяется, что соответствует этапу повторения удачных грузов. При увеличении вибраций снова начинается движение грузов в случайно выбранном направлении и т. д. В результате ротор будет отбалансирован полностью до минимальных вибраций на его опорах.

Случайный поиск с нелинейной тактикой

Описанный выше алгоритм обладает двумя недостатками: он может некоторое время ухудшать объект (когда несколько случайных шагов подряд окажутся неудачными, что весьма возможно) и неприменим к объектам с параметрами, измеряемыми в шкалах наименований. Таких недостатков лишен алгоритм случайного поиска с нелинейной тактикой.

Здесь при неудаче делается не случайный, а обратный шаг — этим восстанавливается предыдущая ситуация. Алгоритм имеет тоже два действия — случайный шаг ξ (без него не обходится ни один алгоритм случайного поиска) и обратный шаг «—», при котором следует сделать шаг, обратный



Граф алгоритма случайного поиска с нелинейной тактикой. Он не дает объекту ухудшать свои свойства, так как при неудаче немедленно следует обратный шаг, то есть восстанавливается исходное состояние, после чего снова делается случайный. Легко видеть, что алгоритм работает и с переменными, измеряемыми в шкале наименований.

Этот гибрид обладает достоинствами алгоритма случайного поиска с линейной тактикой (см. рис. на стр. 165), но не позволяет расстраивать объект при неудачных шагах, так как после неудачного шага немедленно следует обратный шаг (оператор «—»).

предыдущему. При этом исправляются неудачные случайные шаги.

Граф алгоритма показан на рисунке а на стр. 168. Здесь примечательно то, что после удачного случайного шага снова делается новый случайный шаг (в чем и состоит нелинейность тактики — не повторять удачных шагов). Кажущаяся нелогичность такого поведения легко объясняется, если рассмотреть работу алгоритма вблизи цели. Здесь повторение удачного шага чаще всего приводит не к улучшению, а к ухудшению. Дело в том, что в районе оптимума шаги алгоритма адаптации должны быть особо осторожными и нельзя доверять опыту, полученному на предыдущем шаге, даже положительному.

Примером применения алгоритма может служить настройка технологического процесса со многими адаптируемыми (настраиваемыми) параметрами. Если при их случайном изменении процесс не улучшается, то все параметры следует вернуть в исходное состояние (это обратный шаг) и снова сделать случайный шаг. И так до тех пор, пока процесс не улучшится, после чего следует сделать новый случайный шаг, и т. д.

Можно сочетать оба описанных алгоритма и тем самым воспользоваться их преимуществом. Такой «гибрид» показан на рисунке б на стр. 168. Он имеет три действия: случайный шаг ξ, повторение предыдущего шага «+» и обратный шаг «—». Именно поэтому он сохраняет достоинство обоих алгоритмов (кроме разве того, что неприменим для адаптации параметров, измеряемых в шкалах наименований).

Самообучение случайного поиска

Случайный поиск отличается от всех других методов наличием случайного шага, и поэтому, изменяя вероятностные свойства этого шага, можно существенно улучшать эффективность самого поиска. Таких возможностей нет ни у одного детерминированного метода ввиду того, что у них нет случайных шагов. Как же можно изменять свойство случайного шага?

Очень просто, надо изменять вероятности выбора того или иного направления. Например, если вначале параметр x мог и увеличиваться и уменьшаться равновероятно, то вероятность его увеличения можно сделать равной P, а уменьшения $1-P$. При $P>1/2$ будет «снос» параметра x вправо (то есть в среднем он будет увеличиваться), а при

$P < \frac{1}{2}$ его в среднем «понесет» влево, в сторону уменьшения. Как же изменять вероятность P?

Тоже просто — на основе предыдущего опыта. Пусть по параметру x был сделан шаг вправо (а по другим параметрам при этом тоже были сделаны какие-то случайные шаги). И пусть результат оказался успешным, то есть объект адаптации стал лучше. Тогда вероятность увеличения x на следующем шаге, очевидно, надо повысить. Если же шаг был неудачным, то эту вероятность надо уменьшать. И т. д.

Так алгоритм случайного поиска обучается на собственных ошибках и успехах. Такой процесс называют самообучением ввиду отсутствия «учителя», показывающего образцы правильного поведения.

Самообучение является той связующей нитью, которая объединяет случайные и неслучайные методы адаптации. Если все вероятности P в процессе самообучения поиска становятся равными или нулю, или единице, то никакой случайности в поиске уже нет и он становится неслучайным — детерминированным. Так случайный поиск в процессе адаптации детерминируется и переходит в неслучайный.

Отсюда следует очень важный вывод, что случайный поиск обобщает детерминированный, а всякий неслучайный является лишь частным случаем одного или нескольких алгоритмов случайного поиска. Действительно, чтобы двигаться в определенном направлении, существуют много способов исходного случайного поведения (алгоритмов случайного поиска), которые после самообучения придут именно к этому направлению, то есть к детерминированному движению в заданном направлении.

Это обстоятельство делает случайный поиск чрезвычайно привлекательным инструментом адаптации различных объектов.

Случайный поиск и сельское хозяйство

Нет, здесь читатель не найдет конкретных рекомендаций, как повысить эффективность сельского хозяйства с помощью случайного поиска. Но некоторые соображения приведены будут...

Действительно, что такое сельское хозяйство? Это производство продуктов питания. И, как всякое производство,

оно имеет параметры и структуру, правильный выбор которых определяет его эффективность. Следовательно, к сельскому хозяйству можно подходить как к объекту адаптации — параметрической и структурной, а его сложность гарантирует успешность применения случайного поиска, который как раз и ориентирован для адаптации сложных объектов.

Начнем с процесса роста растений. Параметрами этого процесса являются прежде всего сроки всякого рода сельскохозяйственных операций (поливки, прополки, внесения удобрений и т. д.). Очевидно, можно подобрать такие значения этих параметров, что получится максимальный эффект производительности данной культуры. Если к этому добавить соответствующие количества веществ в питание растений, то эффект может быть просто поразительным.

Именно таким оказалось помидорное дерево, выращенное японскими учеными для всемирной выставки «Экспо-85» в городе Осаке весной 1985 года. Нет, это не был какой-то новый сорт, полученный магами генной инженерии. (Известно, что, вмешиваясь в структуру гена растения, можно, вообще говоря, творить чудеса. Но делать это вполне целенаправленно ученые пока не умеют, во всяком случае, для повышения производительности культуры.)

Это был обыкновенный помидорный куст, но выращенный при оптимальных параметрах. В результате он вырос до 5 метров и дал несколько тысяч прекрасных томатов.

Значения параметров процесса выращивания держатся в секрете, но их можно получить, используя методы случайного поиска примерно так, как это описано выше.

Но не в этом состоят трудности сельского хозяйства. Одно помидорное дерево, выращенное в лаборатории, не решит проблему снабжения овощами даже одного магазина. Задача заключается в том, чтобы существенно повысить производительность на полях всей страны. Трудность здесь состоит в необходимости учитывать состояние среды на каждом конкретном поле, то есть состав и влажность почвы, освещенность и другие локальные факторы. Адаптация здесь должна носить сугубо индивидуальный характер.

Сам процесс адаптации может вестись двояким образом. Если есть модель роста данной культуры, то есть представление о том, как реагирует растение на те или иные погодные условия и агрономические воздействия, то

на этой модели всегда можно подобрать такие воздействия (сроки полива, подкормки и проч.), что растение будет расти наилучшим образом при имеющихся погодных и почвенных условиях. Именно так начали выращивать хлопок в одном из районов Узбекистана. И это сотрудничество кибернетиков и агрономов дало удвоение урожая хлопка. Случайный поиск здесь позволял определять оптимальные параметры полива хлопчатника, которые существенно влияют на его урожайность.

Если же модели роста культуры нет, а чаще всего так и бывает, то можно воспользоваться другим приемом. В лаборатории следует точно воспроизвести полевые условия и возможности их изменения с тем, чтобы выяснить, каким образом те или иные изменения влияют на рост растения. Те изменения, которые привели к интенсификации роста лабораторных растений, переносятся на полевые растения.

Очевидно, что для этого лаборатория должна иметь все возможности так менять режимы роста растений, чтобы среди них был наилучший, который и будет использован на поле. Оптимальный план изменения режимов строится с использованием случайного поиска, который позволяет минимальным числом лабораторных растений получить максимальную информацию о том, что надо делать на поле.

Вот так случайный поиск может быть и уже используется на сельскохозяйственной ниве. Аналогично можно его применить в животноводстве (максимизируя ежедневные привесы скота) и в других видах трудного и благородного труда в сельском хозяйстве.

Структурная адаптация

Все, что было сказано выше об адаптации, касалось лишь параметрической адаптации ввиду того, что адаптировались параметры объекта. Алгоритмы такой адаптации указывают, каким образом следует изменять параметры адаптируемого объекта, чтобы привести его в наилучшее состояние.

Но, кроме параметров, всякий объект имеет еще и структуру. Примером является схема структуры организации, которую любят вывешивать кадровики в виде красочного плаката, где указаны подразделения (отделы, лаборатории, цеха и т. д.) этой организации, а стрелками —

взаимоотношения подчинения или включения. Параметрами на этой схеме являются названия подразделений, фамилии их начальников и т. д. Их изменение, как легко заметить, не влияет на структуру организации.

Структура технологического процесса определяет технологические операции и порядок их выполнения. Параметрами же являются названия станков, имена исполнителей, скорости подач, углы заточки резцов и т. д.

Структура любой машины определяет ее конструктивную специфику. Например, все модели ВАЗа имели одну и ту же структуру ходовой части, пока не появилась модель ВАЗ-2108 с передним приводом. Эта конструктивная особенность существенно изменила структуру шасси и улучшила ходовые характеристики машины.

Таким образом, структура является как бы основой, скелетом объекта. Она определяет элементы, из которых состоит объект, и связи между ними. И если изменение параметров не изменяет структуры объекта, она стабильна и консервативна, то изменение структуры объекта может сильно изменить его облик и даже превратить его в другой объект.

Изменять структуру можно двояким способом. Во-первых, путем изменения элементов структуры. Например, менять технологические операции, выполняющие одну и ту же функцию, с тем, чтобы выбрать ту, которая дает лучшее качество изготавливаемого изделия. Например, плоскость можно обрабатывать на токарном станке, фрезерном и шлифовальном. Выбор одного из них и составляет задачу определения структуры технологического процесса.

Во-вторых, структуру можно изменять, меняя связи между элементами. Так, например, поступают при поиске наилучшей структуры организации — меняют подчиненность подразделений (реорганизация).

И, наконец, можно изменять и элементы структуры, и связи между ними. Это самое сильное воздействие на структуру. Оно может кардинально изменить объект как в лучшую, так и в худшую сторону. Искусство алгоритмов структурной адаптации заключается в том, чтобы воспользоваться первым и не допустить второго.

Легко видеть, что с помощью структурной адаптации можно добиться куда более значительных успехов, чем при параметрической. Действительно, изменение структуры коренным образом изменяет объект, и таким путем можно добиться значительного повышения его эффектив-

ности, параметры же меняют эффективность обычно незначительно. Вот по этой-то причине столь и велик интерес к такому виду адаптации.

Методы структурной адаптации существенно отличаются от параметрических. Это и понятно, поскольку изменять структуру всегда труднее, чем параметры. Существующие методы структурной адаптации подразделяются на два класса, в зависимости от специфики объекта.

Такой спецификой является число возможных структур объекта, которые могут быть использованы в процессе адаптации. Если оно невелико, то такую адаптацию называют альтернативной — здесь каждая структура является альтернативой, а задача адаптации состоит в том, чтобы выбрать лучшую на данный момент.

Если же число возможных структур велико, то приходится искать другие подходы.

Альтернативная адаптация

Здесь в распоряжении адаптации имеется лишь небольшое число альтернатив (две-три), и в процессе адаптации нужно выбрать лишь одну из них — ту, которая максимизирует эффективность объекта в данный момент.

Вопрос о выборе альтернатив совсем непрост и заставляет задуматься не только специалистов по адаптации. Но сначала несколько слов о специфике популяризации. Это нужно автору в оправдание приема, используемого ниже.

Чего только не придумали ученые для объяснения своих научных результатов! И дело тут вовсе не только в популяризации. Значительно важнее осмыслить полученные результаты. А это происходит, как правило, на языке повседневной обыденной жизни. Заметим, что подобное осмысливание получило даже научное название — интерпретация, под которой понимается раскрытие смысла нового явления с помощью уже известных средств — образов, явлений, представлений. Естественно, что интерпретация, обращающаяся к повседневной практике, является наиболее доступной тому, кого она интересует.

Заметим, что наличие интереса тоже является важной стороной понимания — при отсутствии интереса понимания добиться очень трудно. Так, очень часто мы не понимаем не из-за сложности явления, а из-за отсутствия интереса к нему. А от чего зависит интерес?

Он, по-видимому, изначален и определяется потребно-

стями. Так, интерес к противоположному полу связан в конечном счете с деятельностью гормональной системы, а интерес к детективным сюжетам — потребностью в раскрывании тайн. Именно эта потребность человека удовлетворяется обращением к детективной тематике. Поэтому детективная интерпретация более доходчива, чем иная, поскольку она интересней (большинству читателей, разумеется). Вот и займемся ею при описании альтернативной адаптации.

«Двурукий бандит»

Такое претенциозное название имеет весьма мирный алгоритм адаптации, позволяющий выбирать лучшую из двух альтернатив в обстановке, осложненной действием посторонних факторов.

Простейшим примером такого двуальтернативного выбора может служить выбор транспорта, например, трамвая или троллейбуса в часы «пик», когда вы добираетесь на работу. Действительно, троллейбусом быстрее, но ввиду малого числа мест есть риск не попасть в первый пришедший. Трамвай всегда забирает всех — мест достаточно, но едет медленнее. Здесь трамвай является одной альтернативой, а троллейбус — другой. Очевидно, что одним из этих видов транспорта добираться в среднем лучше, то есть быстрее. Но каким?

Решить дело двумя экспериментами, съездив один раз на трамвае, а другой — на троллейбусе, нельзя, так как результат каждого эксперимента очень «зашумлен» всякого рода посторонними факторами (несинхронность движения транспорта, возможные случайные «пробки» на улице и т. д.) Значит, надо построить такую процедуру поездок на транспорте, которая выделила бы лучшую альтернативу и причем так, чтобы минимально опаздывать на работу. Это и будет алгоритм альтернативной адаптации (или алгоритм «двурукого бандита»).

Почему же бандит? (Почему «двурукий», ясно — его двурукость связана с двумя альтернативами.) Такое криминальное название придумали американцы — большие любители броских словечек. Есть две трактовки.

Первая (игровая) связана с игральным автоматом, очень распространенным на Западе. Такой автомат имеет рукоятку, дернув за которую (но предварительно бросив в щель монетку) можно выиграть что-то, а можно и ничего не выиграть. Решение о выигрыше и его величине

принимается *случайным механизмом*, который встроен в автомате и запускается рукояткой.

Американцы назвали такой автомат «одноруким бандитом» (естественно, что случайный механизм автомата настроен так, чтобы игрок чаще проигрывал, иначе «бандит» не приносил бы больших доходов своим хозяевам).

А теперь представьте автомат с двумя ручками (таких пока нет), причем известно, что вероятность выигрыша одной ручкой немного больше, чем другой. Но какая именно ручка — неизвестно (например, это решается неким случайным механизмом автомата для каждого игрока отдельно и сохраняется на всю партию).

Легко видеть, что перед нами та же задача о выборе лучшей альтернативы, где результат каждого эксперимента намеренно «зашумлен» случайным механизмом. Алгоритм адаптации должен указывать, в каком порядке дергать за ручки автомата в зависимости от получаемого результата с тем, чтобы выявить «счастливую» ручку и заплатить при этом минимальную сумму.

Вторая (криминальная) трактовка «двурукого бандита» навеяна его названием. Представьте себе настоящего бандита, который отстреливается от полицейских или своих коллег, которым он чем-то не понравился. У него два пистолета разных марок, стреляет он одинаково хорошо с обеих рук, но вот беда... он не знает свойств этих пистолетов. Они попались ему в руки перед началом перестрелки. Зная по опыту, что пистолеты довольно сильно отличаются точностью стрельбы, бандит, естественно, хочет из двух альтернативных пистолетов выбрать с лучшим боем. Время для пристрелки у него нет, и приходится адаптироваться (приспосабливаться) к обстановке. Бандит достаточно квалифицирован, чтобы понимать, что промах из какого-то пистолета вовсе не означает, что этот пистолет плохой — с одной стороны, могла дрогнуть рука, а с другой — промах мог быть следствием нормального разброса, который имеет любое оружие. Именно эти факторы являются «зашумляющими» при выборе лучшего пистолета.

Легко видеть, что перед бандитом со всей неумолимостью встала все та же проблема двуальтернативной адаптации: по результатам стрельбы (попал — не попал) определять очередную альтернативу с тем, чтобы в конечном счете определить лучшую и при этом поразить максимальное число противников (предполагаем, что патронов ему хватает).

Здесь намеренно приведены три обыденных примера задач двуальтернативной адаптации (выбор транспорта, рукоятки и пистолета) с тем, чтобы читатель мог ощутить специфику задачи. Легко видеть, что «двурукость» здесь не принципиальна. Число альтернатив может быть и больше двух. Соответственно алгоритм адаптации, решающий эту задачу, тогда будет называться алгоритмом «многорукого бандита».

А теперь, чтобы показать, что решение задачи важно не только бандитам, рассмотрим задачи альтернативной адаптации ЭВМ. Они возникают благодаря тому, что нельзя заранее определить режим, в котором будет работать ЭВМ. Он зависит от потребностей пользователей, которые предвидеть точно просто невозможно, а прогноз всегда бывает настолько приблизительным, что не дает



возможности сделать что-либо достаточно надежно (может быть, именно поэтому увяла на корню «прогностика» — наука о долгосрочных прогнозах, возникшая лет двадцать назад).

Горе от изобилия

Наверняка почти все слышали о существовании фонда алгоритмов и программ для решения задач на ЭВМ. В этом фонде хранятся программы для самых разнообразных задач. Более того, для одной и той же задачи имеется много разных программ с различными способами (алгоритмами) решения ее.

На первый взгляд кажется, что многочисленность программ должна радовать, как радует всякое изобилие. Но в действительности возникает тяжелейшая проблема выбора той программы, которая лучше решает конкретную задачу пользователя. Как правило, пользователь не знает той специфики своей задачи, для которой имеется программа. Ему нужно решить задачу. Вот и все! И поэтому он выбирает программу из предлагаемых ему фондом случайно.

В этом не было бы большой беды, если бы при таком случайном выборе он редко бы ошибался. Но ошибается пользователь часто и... получает программу для решения «чужой» задачи. Она, конечно, справится и с его задачей, но ценой затраты лишнего машинного времени, за которое приходится немало платить. И неумение выбирать нужную программу оборачивается прямыми потерями. Как же быть?

Именно здесь помогает альтернативная адаптация, где, как легко заметить, альтернативами являются те программы, из которых следует выбрать нужную.

Сортируем... матрешки

Рассмотрим одну из самых распространенных задач, решаемых на ЭВМ, — задачу о сортировке массива информации. Формулируется она следующим образом. Пусть в памяти ЭВМ имеется большой массив записей (анкет, таблиц и т. д.) и эти записи нужно упорядочить по какому-то определенному признаку, например, по дате записи, или ее номеру, или объему, или по какому-либо иному атрибуту. Такие задачи возникают очень часто при обработке экономической, технологической, коммерческой

и многой другой информации; скажем, расположить массив анкет сотрудников предприятия по датам их поступления в эту организацию или каким-либо образом для выявления приоритетов при распределении премии.

Такого рода задачи называются задачами сортировки. Для их решения разработаны многочисленные алгоритмы сортировки. (В семитомной монографии Д. Кнута «Искусство программирования» алгоритмам сортировки посвящен целый толстенный том — третий.) Пользователю, которому предстоит сортировать массив, прежде всего следует выбрать программу сортировки. А таких программ несколько десятков. Какую из них выбрать?

Каждая из них решает поставленную задачу, но поразному. И лишь одна в минимальное время (это зависит от специфики массива, типа ЭВМ, на которой решается задача, от самого алгоритма сортировки и других факторов). Каждая программа будет сортировать один и тот же массив свое время. Ту, которая сделает за минимальное время, следует считать наилучшей. Но выяснить это удается лишь после того, как задача сортировки будет решена. А для другого массива оптимальной окажется другая программа сортировки.

Дело в том, что каждый алгоритм (а, следовательно, и его программа) ориентирован на определенную специфику массива, который надо упорядочить. Такой спецификой могут быть, например, его частичная упорядоченность в одной половине массива и полная неупорядоченность в другой. Зная это обстоятельство, можно выбрать программу сортировки, которая очень быстро упорядочит массив. И чем ближе специфика вашего массива к специфике того, для которого разработан алгоритм, тем лучше работает программа, то есть быстрее сортируется массив. Но если взять «чужую» программу, ориентированную на другую специфику, то расплата почти наверняка будет тяжелой: время сортировки значительно увеличится и, естественно, придется больше платить за решение этой задачи (ведь поговорка «время — деньги» особенно справедлива для ЭВМ, каждая минута работы которой обходится обычно в довольно «круглую» сумму). Но как узнать специфику массива?

Сделать это, конечно, можно, но проще будет его упорядочить любым алгоритмом: ведь, разбираясь в специфике массива, мы, по сути дела, его уже упорядочиваем!

Получился порочный круг: для выбора алгоритма сор-

тировки массива надо знать его специфику, а для ее определения надо упорядочить массив, то есть решить задачу. Как быть?

Если массивы, поступающие на сортировку, имеют любую произвольную специфику, то делать нечего — надо терпеть убыток, рассматривая его как плату за наше незнание специфики массивов, которая может быть какой угодно. Но если, как это и бывает в жизни, какая-то определенная специфика уже есть, что встречается довольно часто, то можно использовать это обстоятельство для адаптации выбора программы сортировки.

Проиллюстрируем эту задачу на шутливом примере ро́бота, собирающего матрешки. Представим себе современное роботизированное производство матрешек. На последней операции стоит робот-сборщик. Он должен поочередно вкладывать матрешки одну в другую. Однако поступают матрешки в неупорядоченном виде, и робот прежде, чем приступить к сборке, должен упорядочить их «мысленно» и производить сборку последовательно, начиная с самой маленькой. Для этого ему следует иметь программу сортировки. Такая программа должна быть заложена в «мозг» робота (ведь робот не более чем вычислительная машина, снабженная средствами сбора информации, например, телевизионным датчиком и манипуляторами, с помощью которых она способна выполнять заданную работу).

Специфика конкретного производства всегда создает специфику неупорядоченности поступления деталей. То же самое происходит и с поступлением матрешек. Например, сначала поступают в перемешанном виде большие матрешки, а потом маленькие — тоже перемешанные. Очевидно, что в этом случае роботу не стоит много крутить своим телевизионным глазом, отыскивая маленькую матрешку, — она где-то в конце партии. Но эта специфика может измениться, и большие матрешки окажутся в конце партии (или в середине). Поведение робота должно при этом измениться, что означает смену программы сортировки на другую, учитывающую новую специфику расположения матрешек на конвейере. Как же роботу выбрать лучшую программу, например, лучшую из двух? Ведь каждая конкретная партия матрешек отличается именно своей конкретностью, и время, затраченное на их сортировку, вообще говоря, случайно. Вот и возникает задача: каким образом, манипулируя двумя программами сортировки и фиксируя лишь затраченное время,

определить, какая из имеющихся программ сортирует в среднем быстрее, и при этом не затратить слишком много времени.

Легко заметить, что это задача «двурукого бандита», у которого вместо пистолетов — программы, выстрел — сортировка поступающего массива, а результат — попадание, если время сортировки мало, и промах, если велико.

Аналогично можно сформулировать задачи выбора наилучших программ оптимизации, решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений и многих других. Все эти задачи будут решаться алгоритмом «двурукого», а точнее, «многорукого бандита», к которому мы и переходим.

Стратегии «стрельбы» альтернативами

Рассмотрим алгоритм «двурукого бандита». Попробуем построить разумные стратегии стрельбы бандита.

Первая (классическая) стратегия опирается на очевидные соображения, что нужно попробовать оба пистолета, а потом принять решение. Сделать это можно, например, так. Произведя N выстрелов из одного пистолета и N — из другого, выбрать тот, которым удалось попасть больше. Такое решение вполне оправданно, но получено оно слишком дорогой ценой. Во время экспериментов с пистолетами поведение бандита нельзя считать наилучшим, так как он будет использовать каждую альтернативу N раз вне зависимости от ее эффективности. Это неразумно. Значительно лучше другая стратегия.

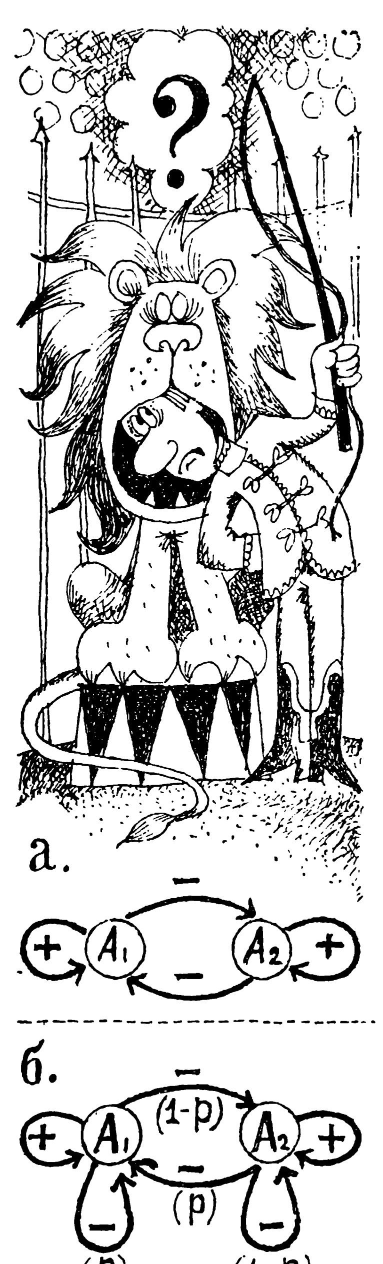
Вторая (линейная) стратегия иногда называется «игрой победителя». Смысл ее прост и естествен: использовать ту альтернативу, которая на предыдущем шаге принесла успех, и обращаться к другой альтернативе, если успеха не было. В «бандитской» интерпретации это означает, что надо продолжить стрелять из того пистолета, который попал, и стрелять из другого при промахе предыдущим.

Легко заметить, что, действуя таким образом, бандит убьет больше своих противников, чем по первой стратегии. Это можно просто показать для одного крайнего случая, когда один пистолет вообще никуда не годится, а второй бьет без промаха. Пусть делается N выстрелов. Тогда первая стратегия дает возможность стрелку свести счеты лишь с $N/2$ противниками, а вторая в самом худ-

шем случае, когда он начинает стрелять из плохого пистолета, обеспечивает $N-1$ попаданий: один промах и переход на другой пистолет, который обеспечивает все попадания.

Рассмотрим линейную тактику подробнее — она этого заслуживает хотя бы потому, что широко используется в природе и лежит в основе организации рационального поведения живых существ. Действительно, повторять то действие, которое приводит к успеху, и менять его на другое альтернативное при первой же неудаче — не в этом ли состоит простейшая, но успешная формула поведения?

Алгоритм линейной тактики удобно представить в виде графа, изображенного на нашем рисунке. Здесь кружками обозначены две альтернативы: первая (A_1) и вторая (A_2). Стрелки указы-



Это схема алгоритма линейной тактики. Линейность здесь заключается в том, чтобы повторять удачное (+) действие, то есть выбирать ту альтернативу, которая проявила себя хорошо, и переходить на другую при неудаче (—).

А это схема алгоритма с обучением, которое заключается в том, что при неудаче (—) не всегда изменяется альтернатива — ведь эта неудача могла быть вызвана простой ошибкой. Обучение здесь сводится к определению вероятности P, которая вычисляется по наблюдениям за работой алгоритма.

вают переходы, которые реализуют работу алгоритма, а значки рядом со стрелками — условия, при которых следует пользоваться данной стрелкой. Здесь плюс (+) обозначает успех применения альтернативы, а минус (—) — неуспех.

Хорошо видно, что в соответствии с таким графом при удаче (+) выбирается та же альтернатива, а при неудаче (—) она изменяется на другую. В этом и состоит линейная тактика.

Однако, действуя таким образом, мы никогда не выберем окончательно одну из альтернатив — лучшую; достаточно одной неудачи, чтобы в соответствии с линейной тактикой сменить лучшую альтернативу на худшую.

Получается, что действовать долго по линейной тактике довольно бессмысленно, так как она заставляет иногда выбирать явно худшую альтернативу. Это происходит из-за того, что алгоритм не обучается, так как не использует опыт предыдущей работы. Действительно, заметив, что одна из альтернатив используется чаще, легко сделать вывод, что она лучше и, следовательно, ею нужно пользоваться еще чаще. А что значит «еще чаще»? Да просто при неудаче этой альтернативы не менять ее на другую, а иногда сохранять. В этом «иногда» и заключается обучение. Сначала оно редко, потом чаще и, наконец, — всегда.

Так мы приходим к вероятностной модели обучения (ведь измерять «иногда» можно вероятностью, которая мала для «редко» и равна единице для «всегда»).

Психологи, изучающие процесс обучения животных, давно заметили вероятностный характер процесса обучения. Это означает, что при обучении заучивание происходит не наверняка, а лишь с определенной вероятностью. Если эта вероятность большая, то говорят о хорошем обучении, а если малая, то обучение плохое.

Граф такого алгоритма линейной тактики с обучением приведен на рисунке **б**.

Как легко заметить, этот граф отличается от изображенного на рисунке **а** двумя дополнительными стрелками, которые определяют переходы при неудаче (—). Теперь при неудаче можно не только перейти к другой альтернативе, но и остаться на прежней.

Для того чтобы знать, когда что следует делать, введены вероятности соответствующих переходов — их значения приведены в скобках.

Теперь ясно, что при неудачном использовании первой альтернативы (A_1) нужно не всегда, а с вероятностью P применить A_1 и лишь в остальных случаях обратиться к A_2 (вероятность этого последнего события равна $1-P$).

При работе со второй альтернативой (A_2) следует поступать наборот: при неудаче с вероятностью $1-P$ оставаться на ней, а с вероятностью P переходить к A_1.

Как видно, использовать алгоритм линейной тактики с обучением очень просто: достаточно уметь разыгрывать случайные события с задачной вероятностью. Как это делать, мы описали в главе о Монте-Карло. Как же определять величину P?

Очень просто! Ведь по своему смыслу в алгоритме эта вероятность соответствует событию, когда мы не верим в неудачу первой альтернативы, то есть относим эту неудачу за счет случайного сбоя, ошибок и т. д., иначе мы перешли бы ко второй альтернативе. Поэтому вероятность P соответствует степени нашей уверенности что A_1 лучше A_2. Эта уверенность возникла на базе предыдущего опыта работы алгоритма.

Так введение обучения позволяет надежно определять лучшие альтернативы поведения в процессе их использования.

Описанный алгоритм может применяться в технике, экономике (например, при выборе лучших методов планирования) и даже в... педагогике, путем выбора альтернативных педагогических приемов.

Структуры, структуры, структуры...

А теперь перейдем к случаю, когда число возможных структур объекта велико, и поэтому нельзя применить алгоритм альтернативной адаптации. Здесь приходится искать другой способ. Но прежде всего следует решить, каким образом представить структуру такого объекта (в альтернативном случае структуры описывались крайне просто: их именами).

Очень удобным средством описания структуры является граф. Каждая вершина имеет свое имя, то есть выполняет свою определенную функцию в структуре (например, в графе структуры книги вершинами являются главы, параграфы, пункты, рисунки, каждый из которых имеет имя — свой номер). Вершины графа связываются дугами, которые отражают отношения между вершинами

(например, отношение включения, как в книге: глава включена в книгу, параграф включен в главу, пункт — в параграф и т. д.).

Оказывается, что такими простыми графовыми средствами — кружками и дугами — можно описывать сложнейшие структуры объектов самой разнообразной природы. Приведем примеры графовых структур.

Мы уже использовали их для описания алгоритмов случайного поиска (см. рисунки на стр. 165, 168). Здесь вершинами были действия, указывающие, что именно следует делать, а стрелки определяли переходы от одного действия к другому при определенных условиях. (Эти условия и являлись именами стрелок.) В графах алгоритмов альтернативной адаптации (см. рисунок на стр. 182) вершинами графа были альтернативные структуры.

И вообще, с помощью графа чрезвычайно удобно описывать всякие алгоритмы и программы, то есть последовательность действий, направленную на выполнение какой-то цели. Пример графа программы мы уже приводили на рисунке на стр. 66, где вершинами (они обозначены прямоугольниками) были арифметические операторы (вычислить, прибавить, сравнить два числа и т. д.), а стрелки обозначали переходы от одного оператора к другому и при необходимости с указанием условия, при котором этот переход выполняется.

Другим примером графа может служить любая электронная схема, где вершинами являются электронные приборы (диоды, транзисторы, емкости, резисторы и т. д.), а связи между ними имеют электрический характер — это проводники. Стрелки в этом случае следует снять, оставив лишь дуги, так как ток в проводнике может течь в обоих направлениях. Заметим, что этот граф имеет и параметры — значения емкостей, сопротивлений и других изменяемых факторов схемы.

Как видно, граф является достаточно мощным средством описания сложных объектов и прежде всего их структуры.

Адаптация структуры как адаптация графа

Описывая структуру объекта графом, мы тем самым можем потом изменять структуру объекта, изменяя граф его модели. Например, изменяя граф электронной схемы, мы изменяем ее функционирование и свойства. Таким образом, изменение структуры сводится к изменению графа,

описывающего эту структуру. А изменять граф можно по-разному: заменяя или добавляя новые вершины, меняя связи на другие, вводя новые или отбрасывая старые и т. д.

Проиллюстрируем адаптацию структуры на примере решения одной чрезвычайно важной проблемы.

Специализация компьютера

Современная универсальная ЭВМ умеет делать очень многое. Ведь ее умение определяется той программой, которую в нее вводят. Сейчас она выявляет закономерность в протоколах наблюдений физического эксперимента, через минуту составляет рецепт оптимального корма для недельных цыплят, через две — решает научную задачу, через три — моделирует выполнение ответственного заказа на заводе, через четыре — проектирует конструкцию моста... И так целый день, точнее, круглые сутки, с небольшими остановками для выполнения тестов — специальных задач, решение которых известно. (С помощью таких тестов проверяется работа компьютера и выявляются неполадки.) Как видим, универсальная ЭВМ и швец, и жнец, и в дуду игрец.

— Что же здесь еще улучшать? — спросит удивленный читатель. Действительно, в таком режиме решения множества самых разных, а порой и неожиданных задач улучшить что-либо очень трудно, разве что повысить производительность с тем, чтобы она решала не тысячу, а две, три... десять тысяч задач в сутки. Но тут возникает другая проблема, где брать задачи, точнее, не задачи (их предостаточно), а программы для решения этих задач. Ведь даже обращение в фонд алгоритмов и программ требует немало времени, не говоря уже о самом процессе программирования.

В аналогичную ситуацию попал Б. Шоу, когда к нему пришла наниматься стенографистка, которая заявила, что умеет стенографировать со скоростью 400 слов в минуту. «Где же я возьму вам столько слов?» — испугался великий драматург. Так что о целесообразности повышения производительности универсальной ЭВМ следует еще крепко подумать.

Всем хорош универсальный компьютер, но слишком уж он... универсален, за что расплачивается снижением производительности, надежности и других ценных качеств (кроме универсальности, разумеется). Здесь сраба-

тывает известный всем эффект комбайнирования: любой комбайн всегда хуже, чем специализированные машины, выполняющие его отдельные функции, так как объединение различных функций всегда идет в ущерб этим функциям. (Вспомним печальную славу кухонных комбайнов — неизменных подарков молодоженам. Его «мясорубные», «кофемольные», «взбивальные» и «давильные» качества всегда ниже, чем у мясорубки, кофемолки, сбивалки и сокодавилки.) Но вернемся к компьютерам.

Универсальный компьютер всегда решит поставленную ему задачу медленней, чем специализированный на нее. Оно и понятно, ведь он создан для решения только такой задачи. Естественно задать вопрос: а не слишком ли расточительно для решения какой-то одной задачи создавать свой компьютер?

Все зависит от того, какая это задача. Для составления рецептов кормовых смесей, наверное, не стоит. А вот для обработки информации, поступающей из космоса, — просто необходимо, так как эта информация идет большим потоком и нельзя потерять ни одного сигнала! С такой задачей справится лишь специализированный компьютер.

Итак, для решения «бытовых» задач (назовем так массовые задачи, загружающие ЭВМ) создаются компьютеры широкого профиля, а для решения «сверхважных» (назовем так задачи, от своевременного решения которых зависит очень многое, например, развитие экономики, обороноспособность и т. д.) делают специализированные ЭВМ.

Между этими бытовыми и сверхважными крайними точками находится значительное число больших задач, требующих специализации компьютера, но не обеспечивающих его постоянную загрузку. Примерами таких задач являются задачи проектирования новой техники, например, задачи обтекания крыла сверхзвуковым потоком, расчета напряжений в конструкции летательного аппарата, выполняющего определенный маневр, выявления сложных закономерностей и т. д. Как быть с этими задачами? Универсальные ЭВМ решают их плохо — нужны часы и сутки машинного времени. А создавать специализированные ЭВМ слишком дорого, так как таких задач не очень много.

Возникшее противоречие решается очень изящным образом — методом структурной адаптации. Нужно адаптировать структуру компьютера к решению именно этой

задачи, то есть следует создавать специализированный компьютер в процессе ее решения.

Для этого нужна структурная адаптация графа, ведь схема компьютера не более чем граф, вершинами которого являются процессоры (решающие устройства), блоки памяти, блоки преобразования информации и т. д., а дугами — связи между ними.

Такой подход требует создания чего-то вроде детского конструктора из деталей для специализированных компьютеров, причем его сборка производится автоматически методом структурной адаптации его графа. Для этого используется модель эволюции, то есть наши представления о том, как идет эволюция в природе.

Подробнее с этим вопросом мы ознакомимся в следующей главе. Забегая вперед, можно сказать, что эволюция происходит методом случайного поиска.

Эволюция графа

Почему именно эволюция? На это есть веские основания. Дело в том, что при изменении сложной структуры зачастую неизвестно, как скажется на работе объекта то или иное изменение. Если бы это было известно, то не было бы проблемы структурной адаптации.

Именно поэтому столь плодотворной оказалась идея моделирования эволюции в процессе адаптации структуры графа. Используется лишь простейшая модель эволюции, которая сводится к случайным мутациям организмов и отбору, но не естественному, а, разумеется, искусственному. (Этот отбор осуществляется не природой, а нами по нашему критерию. В природе естественный отбор идет по критерию приспособленности живых организмов к среде их обитания. В нашей же эволюции критерий отбора искусственный: это эффективность объекта с имеющейся структурой в виде нашего графа.)

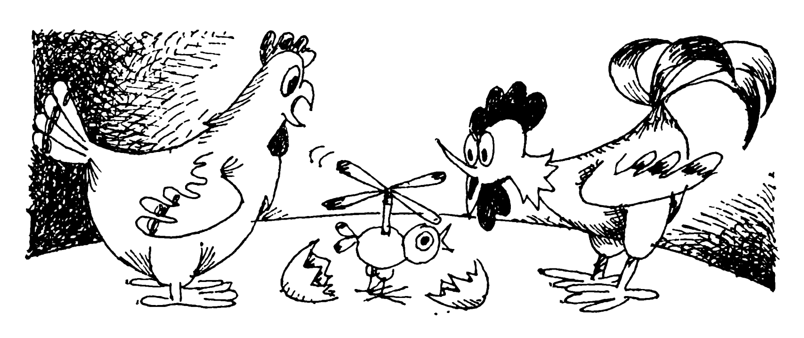
Эволюция графа не может происходить без его случайного изменения. Эти случайные изменения и порождают его «потомков». Например, можно произвольно ввести новое ребро в граф, выбросить случайно выбранное, перекинуть конец какого-то ребра на любую вершину или каким другим образом случайно изменить граф. Полученный «потомок» следует оценить по критерию эффективности. Если он оказался хуже, то следует снова произвольно изменить исходный граф и получить нового случайного «потомка». А если «потомок» оказался лучше

своего «родителя», то ему и «продолжать» род: именно он теперь будет случайно изменяться до тех пор, пока не даст «потомка» еще лучшего. Повторяя этот процесс эволюции достаточное число раз, можно быть уверенным, что в конце концов мы придем к искомому графу. Залогом тому является случайность мутаций графа, которая гарантирует нам реализацию всех возможных структур графа, среди которых имеется искомая — ей просто некуда деться!

Легко заметить, что описанный алгоритм эволюции похож на случайный поиск с нелинейной тактикой, рассмотренной выше. Но здесь случайным шагом является произвольное изменение графа, а обратным шагом — возврат к исходному (родительскому) графу.

Именно таким образом можно создавать структуру специализированной ЭВМ. Более того, алгоритм такой эволюции может перестраивать структуру ЭВМ на решение конкретных задач, специализируя этим самым компьютер.

Таким образом, адаптация графа путем моделирования его эволюции со случайными мутациями и отбором всегда позволяет получать структуры объектов с высокими показателями эффективности. Успешность этой процедуры гарантируется тем, что используются случайные мутации графа. Именно случайность обеспечивает работоспособность такой структурной адаптации!



глава седьмая

СЛУЧАЙНЫЙ ПОИСК В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

В горячку времени стремглав!
В разгар случайностей с разбегу!

Гёте

Три «обидчика»

В многострадальной истории человечества есть три гения, которые очень «огорчили» современников своими открытиями. И эти огорчения были связаны прежде всего с тем, что их открытия заставляли современников подумать о себе хуже, чем им хотелось, то есть низводили человека с небес его представлений на грешную землю.

Это были Николай Коперник, Чарлз Дарвин и Норберт Винер. Н. Коперник очень огорчил святую церковь, доказав, что не Земля находится в центре нашей системы, а Солнце. Отцы иезуиты долго не могли простить ему того, что Земле присвоен лишь четвертый ранг (после Солнца, Меркурия и Венеры) — ведь это почти провинция! И лишь счастливая случайность избавила его от костра.

«Обидчиком» был Н. Винер — создатель кибернетики, науки об управлении сложными объектами любой природы: от технических до биологических. Многим было обидно, что их уникальная деятельность укладывается в «железные» законы теории управления. До мысли о костре не дошло — уж слишком много полезных технических результатов удалось получить, используя методы и методологию кибернетики. Но сама идея, что методы управления едины и не зависят от природы объекта, будь он техническим устройством или живым организмом, многим показалась крамольной.

Но самым большим «обидчиком» справедливо считается Ч. Дарвин — создатель эволюционной теории развития живых существ. Уж слишком противна многим была мысль о происхождении человека от обезьяны. (Заметим, что именно эта самая последняя стадия эволюции больше всего раздражала противников Ч. Дарвина. А то, что эволюция прошла от амебы до обезьяны, то есть неимоверно более сложный путь, чем от обезьяны до человека, их не беспокоило.)

Величие идей эволюции живого мира поразила и лучшие умы того времени. Так, известно, что в свое время К. Маркс хотел посвятить свой «Капитал» Ч. Дарвину.

Что же такое биологическая эволюция? И какую роль в ней играет случайность? Однако прежде следует ответить на другой вопрос — что такое жизнь?



Едва ли найдется что-либо более естественное и более сложное, чем живое существо. Но что такое жизнь? До сих пор строгого, точного и однозначного ответа на этот вопрос никто дать не может. Возможно, что такого ответа и вообще не существует.

Однако для нашего кибернетического разговора о жизни достаточно ограничиться лишь тремя ее основными особенностями. Всякое живое существо всегда и везде обладает по крайней мере тремя свойствами:

1. Воспроизводимостью, то есть способностью порождать существо, себе подобное.

2. Наследственностью — способностью передавать родительские черты детям. Это консервативное свойство позволяет сохранить в организме потомка особенности родителей. Нетрудно же представить, какой ералаш получился бы, если бы это свойство было утрачено!

3. Изменчивостью, то есть способностью к изменению — мутации. Это свойство гарантирует потомкам блеск индивидуальности и позволяет им не быть копией или средним арифметическим своих родителей.

Роль этих трех факторов для жизни трудно переоценить. Без воспроизведения жизнь перестала бы существовать. Без наследственности не было бы преемственности между поколениями и, значит, видовые особенности родителей не передавались бы детям. И наконец, без мутации не было бы изменчивости и развитие жизни не пошло бы далее ее первоначальных форм.

Носителем случайности в процессе эволюции являются мутации, вызывающие изменчивость, которая обеспечивает живые существа столь ценными и необходимыми индивидуальными свойствами. Их ценность прежде всего заключается в том, что дает (точнее, может дать) дополнительные возможности по приспособлению к среде обитания, к своим врагам и сородичам... Именно поэтому так важно знать механизм образования мутаций. А он таков.

Известно, что ткани любого живого организма состоят из клеток. Каждая клетка содержит ядро, которое, в свою очередь, содержит хромосомы — длинные тонкие нити, видимые только в очень сильный микроскоп, и то не всегда. Хромосомы являются носителями всей (точнее, почти всей — на 99 процентов) наследственной информации об организме. Говоря кибернетическим языком, хромосомы — это программы создания нового организма, где команды записаны на языке химических соединений. Различный порядок следования этих соединений в хромо-

соме кодирует различные свойства будущего организма, такие, например, как цвет глаз, форма носа, манера улыбаться (у человека) и т. д.

Единицу наследственности принято называть геном. А все гены вместе, определяющие организм, называют генотипом. Генотип каждого из нас уникален, что и определяет нашу непохожесть на других. В тех редких случаях, когда генотипы двух организмов совпадают, получаются идентичные существа. Это происходит в случае, когда они рождаются из одной яйцеклетки, и называют их однояйцевыми близнецами. Их идентичность определяется идентичностью их генотипов.

При делении клетки сначала делятся хромосомы; каждая хромосома как бы удваивается и образует две совершенно одинаковые хромосомы, которые немедленно расходятся. После деления всех хромосом делится ядро, а потом делится остальное вещество клетки, и обе половинки оформляются в самостоятельные клетки. Так, из одной клетки возникают сначала две совершенно одинаковые клетки, потом после второго деления — четыре, затем восемь, шестнадцать и т. д.

Процесс, при котором происходит удвоение хромосом, чрезвычайно строг. Едва ли можно в технике найти аналог столь точного и безошибочного механизма. При зарождении организма из одной клетки развиваются миллионы с совершенно одинаковыми хромосомами. Однако в мире нет ничего абсолютного, имеется предел точности даже такого процесса. Иногда, очень редко, в этом процессе что-то нарушается — происходит случайный сбой, и наследственная информация, которую несет хромосома, несколько изменяется. Это происходит из-за того, что в результате какой-то случайной помехи хромосома случайно становится чуть-чуть иной (хромосомы тоже живут в нашем случайном мире). Процесс случайного изменения хромосомы и получил название мутации.

Причиной мутаций могут быть самые разнообразные явления — радиация, температура, химические воздействия и... просто случайные помехи в процессе удвоения хромосом.

Когда хромосома, в которой произошла мутация, удваивается, она, как и прежде, точно воспроизводит самое себя, повторяя структуру, полученную в результате мутации. Следовательно, «наследство» мутированной хромосомы также мутированно.

А к чему приводят мутации? Может быть, ввиду ма-

лости они не оказывают существенного влияния на организм? Как может сказаться очень незначительное изменение строения хромосомы на его развитии?

Ответ на эти вопросы будет ясным, если вспомнить, что хромосома, по сути дела, является системой команд, отдаваемых в процессе развития существа. Эти команды и формируют организм. Ясно, что утрата одной из команд или замена ее другой может оказать очень большое влияние на развитие отдельных частей и существа в целом. (Попробуйте изменить одну команду в программе на рисунке на стр. 66, и она будет вычислять все, что угодно, кроме площади заданной фигуры.)

Так как мутации случайны, то они приводят к возникновению у развивающегося организма сугубо индивидуальных особенностей, отличающих его от родителей и сверстников. Эти отличительные свойства могут затронуть любую часть или функцию организма.

Такое случайное воздействие может привести к роковому исходу, если мутация нарушила работу какого-то ответственного органа или лишила существо его каких-то важных приспособительных черт. Мутация может быть благотворной, если благодаря ей развиваются качества, способствующие лучшему приспособлению к окружающей его среде. Результат мутации может быть и безразличным, то есть не оказывает пока ни хорошего, ни плохого влияния на жизнедеятельность организма (например, при изменении формы носа, если, разумеется, он не уродлив, что не смогут не отметить представители противоположного пола и понизить тем самым вероятность передачи этой мутации следующему поколению.) Именно мутации дают возможность изменять живые существа. А вот целенаправленность этого случайного изменения образуется за счет естественного отбора. Открытие Ч. Дарвина фактически сводилось к открытию этого механизма.

Механизм естественного отбора

Как видно, каждый организм случайным образом отличается от другого, подобного ему. Природа, совершая мутацию, как бы делает случайный шаг. Эффективность этого шага определяется самой жизнью. Если организм, развивающийся в результате случайной мутации, оказался менее устойчивым и менее приспособленным к окружающей среде, то он погибает скорее, нежели другие. Следовательно, этот шаг сделан неудачно. Погибая, этот

организм, как правило, не фиксирует своей неудачи в потомстве (ведь он погиб раньше времени). Если же в результате случайной мутации он приобрел новые приспособительные свойства, то он выживает и поэтому передает их потомству. Именно так осуществляется естественный отбор.

Следовательно, если мутации обеспечивают случайное отклонение организма от исходного состояния, то естественный отбор как бы оценивает результат этого отклонения.

Происходит отбор по принципу: выживает, размножается и передает свой генотип потомству более приспособленный. Мутация же обеспечивает случайное изменение генотипа, что и обуславливает большую или меньшую приспособляемость организма. Ясно, что без мутации не появилось бы изменчивости и той удивительной приспособленности и «разумности» строения организмов, которой не перестают восхищаться и удивляться по сей день.

Случайные мутации в сочетании с естественным отбором представляют собой одну из величайших движущих сил эволюции, а поскольку эволюционный процесс не прекращается, то и мутации по-прежнему чрезвычайно важны для развития жизни на Земле.

Это одна сторона явления.

Другая заключается в том, что большинство новых мутаций вредно или даже смертельно.

Причина заключается в том, что каждый организм есть результат длительной эволюции, он чрезвычайно тонко приспособился к окружающей среде, и далеко не всякое случайное изменение в его структуре, вызванное мутацией, идет ему впрок. Скорее наоборот. Для улучшения высокоорганизованного организма нужны мутации специального характера, которые, естественно, встречаются редко, и может пройти много времени, прежде чем будет найдена новая нужная мутация. Может случиться и так, что за то время, пока она произойдет, организмы этого вида вымрут, причем не столько из-за отсутствия нужной мутации, сколько из-за избытка ненужных и вредных.

Выходит, таким образом, что случайные мутации столь же вредны, как и необходимы. Вид, у которого мутации возникают слишком часто, например, под действием радиоактивного излучения, может исчезнуть потому, что многие его представители в результате появления вред-

ных мутаций будут слабыми и недолговечными. В свою очередь, виды, имеющие мутации слишком редко, благоденствуют лишь до тех пор, пока изменившиеся условия жизни не потребуют от них новых приспособительных свойств, для чего у них не окажется необходимого запаса изменчивости. Так, по-видимому, относительно недавно вымерли мамонты, не сумевшие приспособиться при быстром изменении климата на Земле во время ледникового периода. (Это одна из известных гипотез гибели мамонтов.)

Представим себе следующий редкий, но вполне возможный случай. Пусть какой-то вид животных или растений находится в полной гармонии с природой. У него почти нет врагов. Представители этого вида — сильные, здоровые особи с хорошо сформированным организмом; они быстро размножаются, и им пока не грозит опасность перенаселения. Ухудшения породы в результате мутаций пока незначительны и не могут нарушить здорового оптимизма представителей этого счастливого вида. Но вдруг в одно несчастное время их золотому веку пришел конец — резко изменились внешние условия, например, появились сильные конкуренты. Тут же начнет действовать жестокий механизм естественного отбора, и только мутация, которая обеспечила бы если не преимущества перед конкурентами, то хотя бы условия для сосуществования с ними, может спасти этот вид. Если она произойдет слишком поздно, то вид погибнет. Так было неоднократно в истории Земли и так продолжает быть по сей день. Причем все в более жесткой форме.

Дело в том, что с появлением человека интенсивность воздействия нашей цивилизации практически на все виды растений и животных возрастает день ото дня. На одни виды воздействие больше, на другие — меньше. Вид не может быстро измениться, так как слишком маловероятно появление нужной ему мутации — ее приходится ждать долго — и... слишком часто вид вымирает, так ее и не дождавшись в быстро изменяющихся условиях. Так, известно, что сейчас под давлением цивилизации в год вымирает более ста видов растений и животных. Но тем не менее некоторые из них успевают приспособиться. Это значит, что они дождались спасительной мутации и на какое-то время гарантировали себе сносное существование. Так, скажем, появились разновидности моли, которые питаются синтетическими тканями, и комары, проникающие в жилище через вентиляционные трубы (раньше комары

этого не умели делать, хотя вентиляция была уже давно).

Внимательный читатель, наверное, заметил, что биологическая эволюция «работает» методом случайного поиска. При этом она делает случайные шаги в виде случайных мутаций и с помощью механизма естественного отбора сохраняет лишь то, что получилось более эффективным, — все остальное отмирает, оставляя поле для более приспособленных. Именно так в природе реализуется исправление допущенных ошибок.

Молотком по... телевизору

Но если этот поиск случайный, то его эффективность в значительной мере определяется вероятностью удачных случайных шагов, то есть нужных виду случайных мута-



ций. Эта вероятность, как следует из описанной выше модели эволюции, крайне мала.

Но, пожалуй, не это самое страшное. Пугает то, что разрушает генотип подавляющее число ненужных мутаций, воздействующих на жизненно важные органы и функции организма и снижающих или даже разрушающих его приспособляемость, уже имеющуюся ранее. В результате вид должен вымирать не от недостатка полезных мутаций, а от избытка вредных.

Ситуация здесь примерно та же, когда вы попытаетесь отремонтировать телевизор, запустив в него молотком. Хотя и есть ничтожная вероятность починить его при случайном попадании молотка в нужное место, но этим никто не пользуется, разумно считая, что скорее всего после такого «ремонта» телевизор придется выкинуть.

Эту же мысль очень эмоционально высказал один известный астроном: скорее ураган, пронесшийся по кладбищу старых самолетов, соберет новехонький суперлайнер из кусков авиационного лома, чем в результате случайных мутаций возникнет жизнь и будет эволюционно развиваться. Здесь случайные мутации справедливо сопоставлены со страшным ураганом, случайно и фатально изменяющим живой организм.

Естественно задать вопрос: а верна ли описанная выше дарвиновская модель эволюции? Как получилось, что, несмотря на ураганы фатальных мутаций, живые организмы не только выжили и великолепно приспособились, но и эволюционировали до человека?

Этот вопрос давно беспокоил всех, кто задумывался над проблемой эволюции. Мучительные размышления приводили обычно к весьма грустным выводам о несостоятельности дарвиновской модели эволюции. Иные додумались до прямого мистицизма, полагая, что эволюция не случайна, а изначально целенаправлена куда-то благодаря «стремлению к самоусовершенствованию», свойственному всем живым организмам. Отсюда, как легко заметить, прямой путь к божьему помыслу, религии и мракобесию. Вот до чего может довести неправильное и предвзятое истолкование описанного механизма эволюции. Но есть ли другие пути? Существуют ли иные механизмы эволюции, которым не страшен разрушительный ураган случайных мутаций?

Нет, таких путей нет, и причиной этому является случайность мутаций. Вот если бы каким-либо образом уда-

лось снизить убийственность подавляющего числа мутаций и разрушительный ураган превратить в свежий ветер случайных, но не фатальных мутаций!

Такой механизм есть. Его давно изобрела природа в виде полового скрещивания, в процессе которого из двух родительских генотипов образуется один — потомка. В процессе образования нового генотипа из двух родительских одна часть генов берется от одного родителя, а другая от другого (по принципу: нос папин, а глаза мамины). Это тоже случайная мутация, и проявляется она в том, что механизм наследования случаен, то есть заранее точно сказать нельзя, чьи и какие гены получит ребенок. Такой процесс называют рекомбинацией генов.

В результате рекомбинации образуются новые генотипы и, следовательно, новые особи. Например, если папин генотип содержит гены черных глаз и носа с горбинкой, а мамин — голубые глаза и курносый нос, то у их детей возможно появление новых генотипов, где сочетаются гены черных глаз и курносого носа или голубых глаз и носа с горбинкой. Если эти новые генотипы приводят к повышению приспособленности особей, то они и сохранятся в потомстве.

Но главное не в этом. Механизм рекомбинации почти не дает летальных (смертельных) исходов! Действительно, мутации такого рода приводят лишь к различным комбинациям уже имеющихся вполне доброкачественных генов родителей (их доброкачественность доказана существованием и процветанием родителей, которые преуспели настолько, что даже решили и сумели завести семью).

Именно поэтому родители всегда ждут здорового ребенка с теми или иными особенностями. Но почти всегда это будет нормальный ребенок, несмотря на мутации в виде случайных рекомбинаций генов родителей. Эффективность такого механизма очевидна, и это сказывается на темпе эволюции. После «изобретения» природой полового способа размножения темп эволюции резко увеличился, что и привело к появлению человека. Не будь случайных рекомбинаций полового скрещивания, нам до сих пор пришлось бы пребывать на дне мелких теплых лужиц в виде простейших организмов.

Можно уверенно сказать, что человек как вид появился у отца — естественного отбора и матери — случайной рекомбинации, реализующей случайные мутации при скрещивании. Так случайность пробила себе дорогу

к самому сложному и самому таинственному эволюционному процессу появления человека. Именно благодаря этому мы существуем как люди.

Эволюция как случайный поиск

Любопытно, что против описанной выше модели эволюции, использующей в качестве основного «сырья» случайные мутации, выдвигаются те же обвинения, что и против случайного поиска при его появлении. Мы их рассмотрели в пятой главе.

Если считать, что биологическая эволюция происходит методом случайного поиска, то естественно использовать «за эволюцию» аргументы, приводимые в защиту случайного поиска. Так и поступим.

Самым главным обвинением случайной эволюции является недостаток времени (всего 3 миллиарда лет) и маловероятность случайного появления хотя бы одного, самого простого, генотипа, с которого началась жизнь на Земле. Этот простейший генотип должен иметь примерно тысячу генов, каждый из которых записывается примерно тысячью «букв» генетического алфавита, имеющего лишь четыре буквы А, Г, Ц, Т, обозначающие специальные химические соединения — нуклеотиды: А — аденин, Г — гуанин, Ц — цитозин, Т — тимин. С помощью этих четырех «букв» и записывается «текст» генотипа.

Таким образом, генотип можно представить как сообщение, стоящее из тысяч слов-генов, каждое из которых имеет тысячу букв из четырехбуквенного алфавита А, Г, Ц, Т. Если текст такого простейшего генотипа записать типографским шрифтом, то он займет более чем 400 страниц — вполне солидный том.

Естественно, что появление такого тома нельзя считать случайным, и это обстоятельство лежит в основе всех «доказательств» несостоятельности дарвиновской модели эволюции. Но случайность в сочетании с естественным отбором вполне справляется с этой сложнейшей задачей в процессе эволюции, как ее представил Ч. Дарвин.

Основным аргументом против дарвиновской эволюции является то, что, мол, у природы не хватило бы времени, чтобы создать столь совершенные организмы путем только случайных мутаций, так как три миллиарда лет не столь большой срок, чтобы появился не только человек, но и просто многоклеточный организм. Соображение о медлительности эволюции, опирающейся на случайные

мутации и естественный отбор, всегда было решающим в спорах с дарвинистами.

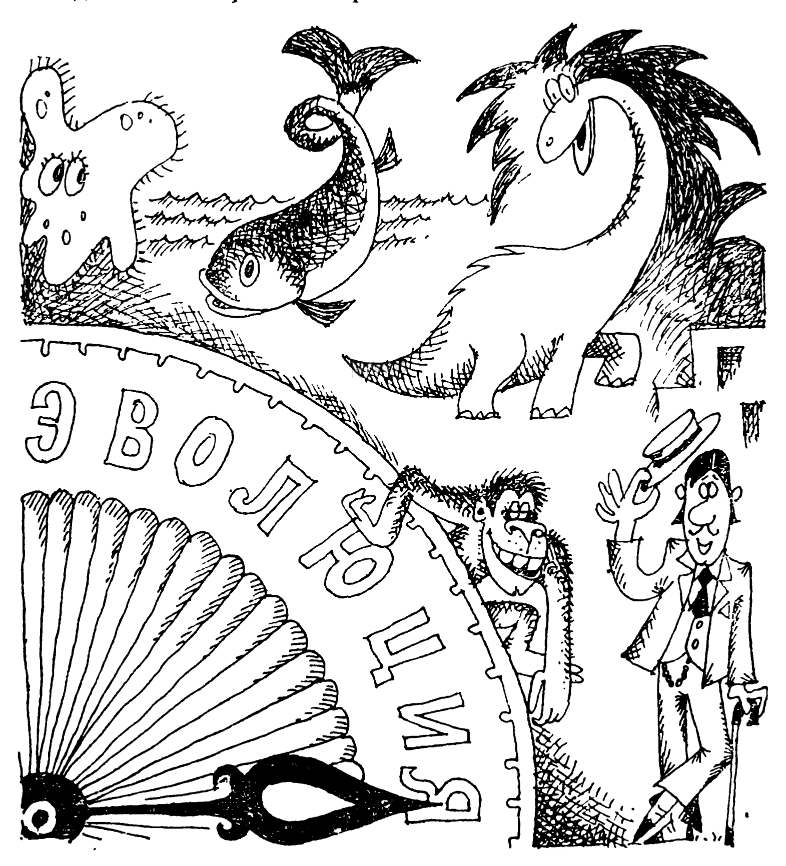
Автор ввязывается в этот спор как специалист по случайному поиску, которому неоднократно приходилось парировать выпады против случайного поиска с примерно такой же аргументацией, что случайность — это всегда плохо.

Но прежде всего следует поговорить о соотношении между дарвиновской эволюцией и случайным поиском.

Легко показать, что эволюция является случайным поиском решения — генотипа R, наилучшего для данных условий существования вида с этим генотипом. Ведь генотип — не что иное, как набор миллиона параметров:

$$R = (x_1,\ x_2,\ x_3,\ \ldots x_{1000000}),$$

каждый из которых измеряется в шкале наименований с



именами А, Г, Ц, Т. Эффективность Q решения — генотипа R определяется как степень приспособленности особи, имеющей такой генотип.

Генотип любого потомка отличается от родительского — это случайный шаг, эффективность которого проверяется жизнью. Если потомок выжил, что означает удачность шага алгоритма, то он становится родителем и передает свой генотип для дальнейшей эволюции — поиска. При неудачном случайном шаге — изменении генотипа — он вымирает, оставляя поле для более удачливых.

Легко заметить, что это не что иное, как алгоритм случайного поиска с нелинейной тактикой, изображенный на рисунке на стр. 168, где ξ — случайное изменение генотипа, а «—» — вымирание. «Мудрость» природы заключается в том, что она «выбрала» этот простейший алгоритм для эволюции, что и дало ей возможность создать то разнообразие видов, которое мы имеем сейчас. Если говорить точно, без аллегорий, то природа ничего не выбирала — просто такова она есть, а мы, найдя этот алгоритм после долгих трудов и усилий, только позже поняли, что можно было бы сразу найти его, прямо копируя природу.

Любопытно, что использование любого другого метода, а не случайного, в такой ситуации, как эволюция генотипа, привело бы к ее значительному замедлению. Действительно, вспомним, что скорость оптимизации методом случайного поиска пропорциональна $\frac{1}{\sqrt{n}}$, а регулярным методом $\frac{1}{n}$. В данном случае, когда $n=1000000$, скорость такой эволюции в тысячу раз (!) быстрее, чем той, которая использовала бы регулярный метод.

Таким образом, можно смело утверждать, что эволюция, использующая случайный поиск и открытая Ч. Дарвином, не только имеет право на существование, но и великолепно объясняет разнообразие имеющихся форм жизни, вызванных различными условиями существования. Несомненно, что эволюция идет методом случайного поиска и только благодаря ему, идет столь быстро, так, что простейшие формы жизни за «какие-нибудь» три миллиарда лет доэволюционировали до человека. Так что, дорогой читатель, как это ни парадоксально, но мы с вами многим обязаны случайному поиску, если не сказать — всем, то есть своим существованием как вида с гордым названием «Homo sapiens» — человек разумный.

А теперь рассмотрим, как природа использует случайный поиск в поведении животных. Но сначала об условных рефлексах.

Блеск и нищета условных рефлексов

Говоря о поведении животных, обычно вспоминают условные рефлексы. Известно, что под условным рефлексом подразумевают искусственно выработанную связь между ситуацией (стимулом) и реакцией животного на эту ситуацию. Например, как выработать слюновыделение собаки на звонок, то есть установить в животном связь между звонком и появлением слюны? Очень просто — кормить ее одновременно со звонком. После нескольких таких трапез собака будет уверенно выделять слюну на звонок даже при отсутствии пищи.

Создатель теории условных рефлексов гениальный физиолог И. Павлов увидел в механизме рефлексов фундамент для объяснения поведения животных (и человека в том числе). И на это были веские основания.

Действительно, не так ли и мы обучаемся правильным реакциям, без которых не может быть и речи о сносном существовании в нашем беспокойном мире? Безусловно, механизм условных рефлексов играет огромную роль в поведении всех животных и человека прежде всего. А так как образование условного рефлекса требует хорошо развитой нервной системы, то есть мозга, в котором и образуются требуемые связи, то богатство условных рефлексов прямо пропорционально сложности нервной системы. Так, например, они с большим трудом вырабатываются у насекомых и очень просто у млекопитающих.

Всем хороши условные рефлексы, но ...слишком дороги. Ведь для образования иного условного рефлекса потребуется несколько десятков, а то и сотен циклов обучения. Условные рефлексы обеспечиваются только при многократном «проигрывании» одной и той же ситуации. А если такой повторяемости нет? Как должно вести себя животное в такой «нештатной» ситуации? Неужели никак? Но ведь в жизни всякого животного такие новые ситуации встречаются очень, даже слишком, часто. Как же ведет себя животное?

Некоторые замирают, если ситуация похожа на опасную. Это тоже поведение, но пассивное и не типичное для большинства. А как же действует большинство?

Оно действует методом случайного поиска! При этом

используются все алгоритмы, описанные в предыдущей главе. Рассмотрим их применительно к поведению животных.

Случайное поведение и случайный поиск

Алгоритм случайного поиска с нелинейной тактикой (мы его рассмотрели в предыдущей главе — он показан на стр. 168) используют очень осторожные животные. При этом они на каждом шаге минимизируют опасность. Сделав случайный шаг в неизвестной ситуации (вперед, вправо или влево), животное оценивает результат этого шага по «страшности» новой ситуации. Если она увеличилась, то животное отступает — делает обратный шаг в ситуацию, где все было известно, проверено и не опасно. Если опасность не увеличилась, то делается новый случайный шаг и т. д.

Такая техника поведения позволяет животному сохранять свою безопасность и исследовать новую территорию. Случайность шагов обеспечивает широкий охват местности, а возврат при неудаче гарантирует безопасность, точнее, неповышение опасности по сравнению с исходной.

Алгоритм случайного поиска с линейной тактикой (см. стр. 165) является, пожалуй, самым распространенным в животном мире. Он используется всеми, начиная от бактерий и кончая человеком.

Действительно, ничего нет логичнее, чем повторять удачные шаги. Для того чтобы реализовать этот алгоритм, необходимо иметь минимальный запас средств. Во-первых, иметь возможность оценивать расстояние до цели или приближение к ней. И уметь располагать механизмом выбора случайного шага или направления, во-вторых.

Любое животное имеет эти возможности. Так, например, многожгутиковые бактерии, двигаясь к привлекательно пахнущей пище, используют случайный поиск с линейной тактикой. Случайное направление движения образуется в результате вращения всеми жгутиками в разных направлениях. В результате бактерия движется «кубарем» и, раскинув ножки, фиксируется в случайно ориентированном положении. Далее начинается движение в выбранном направлении на 2—10 длин туловища. Причем в направлении повышения концентрации привлекательно пахнущего вещества длина траектории увеличивается, за счет чего и образуется ее целенаправленное движение к источнику запаха. Далее опять «кубарем» и

т. д. Если концентрация вещества всюду одинакова, смещение во всех направлениях будет примерно одинаковым.

Здесь есть оба действия алгоритма случайного поиска с линейной тактикой: выбор случайного направления при кувыркании бактерии и повторение удачных шагов при удлинении траектории в направлении цели.

Случайный поиск с самообучением, описанный в предыдущей главе, широко используется животным с хорошо развитой нервной системой. Так, например, можно заставить рыб плавать по определенной траектории в аквариуме, если «наказывать» их ударом тока за отклонение от траектории. После нескольких сеансов такого обучения рыбы некоторое время движутся по этой траектории и без корректировки электрическим полем. Здесь результатом обучения является условный рефлекс движения по заданной траектории. Но вырабатывался он в процессе случайного поиска рыбой «ненаказуемых» ситуаций.

Модель случайного поиска очень хорошо описывает одно из замечательных свойств живых организмов — их активность. Вполне сытое и здоровое животное без видимых внешних причин почему-то проявляет активность в виде поиска, и этот поиск явно случайный. Более того, он имеет глобальный характер, когда животному приходится преодолевать препятствия как физические, так и психологические. Что же побуждает его к постоянному поиску?

В классической теории это объясняется осуществлением специального безусловного рефлекса — рефлекса любознательности, смысл которого теперь легко объясняется, если под «удачей» в алгоритме случайного поиска подразумевать получение новой информации. Действительно, само существование животного требует, чтобы оно находилось все время в состоянии случайного поиска: (замереть, принюхаться, прислушаться, оглядеться, потрогать осторожно). Все эти действия производятся для сбора информации, необходимой для выбора дальнейшего поведения. Именно ради создания этого запаса и проявляется активность в виде случайного поиска — активность, являющаяся основой выживания.

Замечено, что случайный поиск используется животными при слабых сигналах о цели, что и заставляет их искать ее, вводя случайность в свое поведение. При сильных сигналах о положении цели срабатывают более «грубые» алгоритмы поведения, например, рефлексы (услов-

ные и безусловные), и поведение животного становится очень простым, так как оно детерминируется только целью. Например, при преследовании добычи собака движется строго в направлении цели, хотя это и неоптимально (лучше упреждать цель так, как это делают охотники). Здесь нет никакого поиска (а случайного и подавно). Близость и движение добычи «включают» инстинкт преследования, который и действует, пока видна добыча.

Совсем иное поведение собаки при движении по очень слабому следу. Оно явно имеет случайный характер — здесь сочетаются обе тактики случайного поиска: линейная и нелинейная. Потеряв след, собака возвращается в то место, где он был, и, не найдя его, начинает искать случайно (это нелинейная тактика). Но найдя его и сделав несколько шагов по нему, она убыстряет движение в этом направлении (это линейная тактика).

При движении по сильно пахнущему следу собака переходит от случайного поиска к неслучайному-рыскающему. При этом она рыскает вправо-влево строго относительно следа. Здесь нет случайности, это условный рефлекс. Таким образом, случайный поиск является надежным и эффективным средством поведения живых существ в ситуации, осложненной отсутствием необходимой информации.

Читатель, наверное, заметил, что в этой главе автор воспользовался не очень «честным» приемом замены причины следствием при описании эволюции и поведения животных. Ведь сказать, что в эволюции и поведении животных природа пользуется случайным поиском, равносильно известному утверждению, что яйцо учит курицу.

В свое оправдание автор может привести лишь два аргумента. Во-первых, таков стиль популярного изложения, от которого автор не мог отказаться (желание «ошарашить» читателя слишком соблазнительно, чтобы им не воспользоваться, хотя бы ради завлекательности). А во-вторых, и это самое главное, таким приемом автор старался выразить мысль о всеобщности методов случайного поиска — мысль, к сожалению, не всеми еще понятую.

Заключение

О сколько нам открытий чудных
Находит просвещенья дух,
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг,
И случай, бог изобретатель.

А. С. Пушкин

Эти известные стро́ки помещены здесь ради последней строки́, которую обычно не приводят. Такая «утрата» не случайна — она свидетельствует о негативном отношении к случаю. Целью этой книги было утвердить гениальное прозрение великого поэта и... новый взгляд на случайность как на источник неограниченных возможностей.

Все, что рассказано в этой книге, реально, то есть имеет место на самом деле: широко используются рандомизация, методы Монте-Карло и случайный поиск и т. д. Все это добротные, проверенные жизнью методы использования случая во благо человека, освоенные, правда, сравнительно недавно.

А сейчас мы ступим на стезю зыбких гипотез и предположений, с которых всегда начинается прозрение и познание. Автор здесь намеренно облекает свои мысли в форму расплывчатых утверждений. И вовсе не для того, чтобы щегольнуть объективностью. А потому, что действительно допускает существование другого взгляда, не менее обоснованного.

Мысль, которую столь путано пытается оговорить автор, проста: а не является ли наш мир (физический, биологический и всякий другой...) со всеми своими достоинствами и недостатками результатом «утилизации» случайности каким-то простым и мощным механизмом типа случайного поиска? Случайности в нашем мире хоть отбавляй, ее предостаточно! Располагая таким огромным и неисчерпаемым ресурсом, природе ничего не осталось, как «изобрести» способ ее использования, и этим способом является случайный поиск, результатом которого и есть все то, что нас окружает. Его величество Случайный Поиск, по-видимому, и есть тот основной механизм, который формирует облик нашего мира.

Если читателю эта мысль покажется противной, он вправе предложить другую, с которой автор с удовольствием ознакомится, хоть, может, и ему будет тоже противно.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ИБ № 4627

Леонард Андреевич Растригин

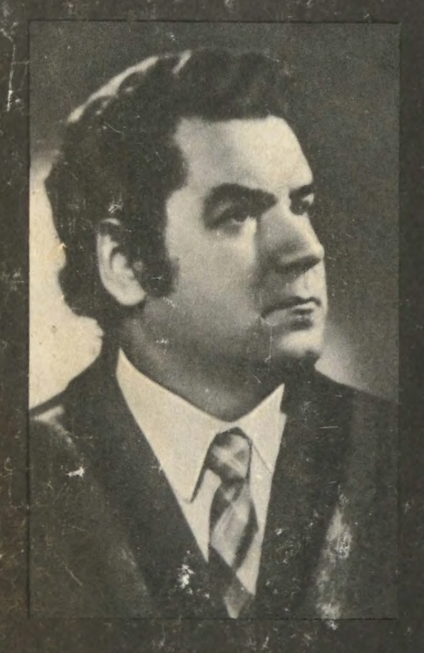
ПО ВОЛЕ СЛУЧАЯ

Рецензент **И. Ушаков**
Редактор **В. Федченко**
Художник **К. Мошкин**
Художественный редактор **Т. Войткевич**
Технический редактор **В. Пилкова**
Корректор **Е. Дмитриева**

Сдано в набор 17.12.85. Подписано в печать 15.05.86. А08139. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 2. Гарнитура «Обыкновенная новая». Печать высокая. Усл. печ. л. 10,92. Усл. кр.-отт. 1,52. Учетно-изд. л. 11,7. Тираж 100 000 экз. (1-й завод — 50 000 экз.). Цена 55 коп. Зак. 2317.

Типография ордена Трудового Красного Знамени издательства ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия». Адрес издательства и типографии: 103030, Москва, К-30, Сущевская, 21.

Эврика



ЛЕОНАРД АНДРЕЕВИЧ
РАСТРИГИН

Доктор технических наук, профессор Л. Растригин написал более двадцати книг, из них семь научно-популярных.

В этой книге он продолжает начатый еще в книге «Этот случайный, случайный, случайный мир» разговор о случайности. Будучи создателем научной школы случайного поиска — нового метода оптимизации и адаптации сложных систем с использованием случайности,— он рассказывает, как использовать случайность для решения сложных задач, выдвигаемых современной наукой, техникой и народным хозяйством.

55 коп.

МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ